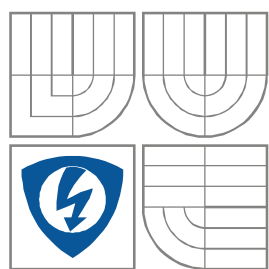


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## **MODELY ČLOVĚKA V ŘÍDICÍCH SYSTÉMECH**

HUMAN MODEL IN CONTROL SYSTEMS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

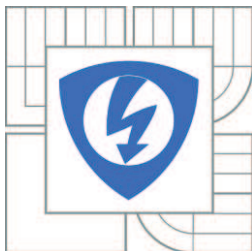
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**PETR BOHÁČ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. Marie Havlíková, Ph.D.**

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav automatizace a měřicí techniky**

# **Bakalářská práce**

bakalářský studijní obor  
**Automatizační a měřicí technika**

**Student:** Petr Boháč

**Ročník:** 3

**ID:** 115153

**Akademický rok:** 2010/2011

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Modely člověka v řídicích systémech**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Vypracujte souhrnný přehled modelu lidského operátora v řídicích systémech, zaměřte se zejména na kompenzační způsob řízení.
2. V programovém prostředí Matlab / Simulink vytvořte simulační modely vybraných přenosových funkcí člověka jako akčního členu a porovnejte jejich dynamické vlastnosti v otevřené smyčce zpětnovazebního systému.
3. Pomocí programového prostředí Matlab vytvořte jednoduché uživatelské prostředí pro měření dynamických vlastností lidského operátora pomocí pákového ovladače Joystick. Součástí programu bude možnost porovnání se simulačními modely vybraných přenosových funkcí operátora a možnost změny parametru.

### **DOPORUCENÁ LITERATURA:**

JALOVECKÝ, R. Člověk v systému řízení letu letounu. In Sborník 8. mezinárodní vědecké konference

Diagnostika Měření Spolehlivost Palubních soustav letadel 2008, 22-23.10.2008, Brno. Brno : Univerzita obrany, 2008, s. 67-74. ISBN 978-80-7231-555-0.

HAVLÍKOVÁ, M. Člověk jako regulátor v systémech MMS. Automatizace, 2007, roč. 2007, č. 6, s.

388-389. ISSN: 0005-125.

Dle pokynu vedoucí práce

**Termín zadání:** 7. 2. 2011

**Termín odevzdání:** 30. 5. 2011

**Vedoucí práce:** Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

**prof. Ing. Pavel Jura, CSc.**

*Předseda oborové rady*

### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku c.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Cílem této práce je poskytnout souhrn modelů člověka v řídicích systémech. Zaměřil jsem se zejména na řízení automobilů a letadel. Modely vycházející z PID regulátoru jsem zhodnotil z hlediska chování v otevřené smyčce a navrhl způsob stanovení jejich parametrů pomocí metody Nelder-Mead.

## **Klíčová slova**

Regulace, Matlab, Příčné řízení, Podélné řízení, Přenosová funkce, Robot typu automobil.

## **Abstract**

The aim of this paper is to provide a summary of human models in control systems. I focused mainly on controlling of cars and airplanes. Models based on the PID controller are assessed in aspects of behavior in open loop. I suggest method of determining their parameters using the Nelder-Mead method.

## **Keywords**

Regulation, Matlab, Lateral control, Longitudal control, transfer function, Car-like robot.

### **Bibliografická citace:**

BOHÁČ, P. Modely člověka v řídicích systémech. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 55s. Vedoucí bakalářské práce byla Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Modely člověka v řídicích systémech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **30. května 2011**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Marii Havlíkové, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **30. května 2011**

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod.....	11
2	Lidský operátor.....	12
2.1	Druhy řízení a regulace .....	12
2.1.1	Přímé řízení – řízení v otevření smyčky.....	12
2.1.2	Kompenzační řízení.....	13
2.2	Modely člověka .....	15
2.2.1	Fyziologický model člověka .....	15
2.2.2	Člověk z pohledu psychologie.....	15
2.2.3	Fyzikální modely .....	16
2.2.4	Ergonomické modely.....	16
2.2.5	Modely řízení .....	16
3	Modely řízení .....	17
3.1	Podélné řízení.....	17
3.1.1	Modely podélného řízení .....	18
3.1.2	Současné metody tvorby databází.....	19
3.1.3	Vytvoření modelu .....	20
3.1.4	Gippsův model .....	21
3.2	Příčné řízení .....	24
3.2.1	Modely příčného řízení.....	25
3.2.2	Přenosové funkce řidiče.....	26
3.2.3	Prediktivní modely .....	27
3.2.4	Modely pilotů .....	29
3.2.5	Rozdíl jízdy v tunelu a na volné komunikaci.....	32
4	Realizace Měření parametrů lidského operátora.....	34
4.1	Matlab .....	34
4.1.1	Simulink .....	34
4.2	Měřicí metoda .....	35
4.3	Model řízený člověkem .....	36
4.3.1	Měření odezvy .....	37
4.3.2	Vstupní signál.....	38
4.3.3	Řízená soustava .....	39
4.3.4	Nehomogenita času měření.....	42
4.4	Model řízený počítačem .....	43

4.5	Navržené hodnoty parametrů.....	45
5	Analýza výsledků .....	50
6	Závěr .....	51



## Seznam obrázků:

Obr. 1 Schéma řízení.....	13
Obr. 2 Schéma regulace .....	13
Obr. 3 Příklad odezvy na jednotkový skok.....	14
Obr. 4 Blokové schéma podélného řízení.....	18
Obr. 5 Podélné řízení - konstantní vzdálenost mezi vozidly.....	18
Obr. 6 Zpracování dat z databáze .....	19
Obr. 7 Vzájemná úměra modelů a dat ICC-FOT [21] .....	22
Obr. 8 Vzájemná úměra modelů a dat SAVME [21].....	23
Obr. 9 Četnost vypočtených parametrů Gippsova modelu z dat ICC-FOT [21] .....	24
Obr. 10 Příčné řízení - jízda v jednom pruhu .....	25
Obr. 11 Blokové schéma příčného řízení .....	26
Obr. 12 Blokové schéma příčného řízení s predikcí .....	28
Obr. 13 Blokové schéma modelu predikčně kompenzačního řízení .....	28
Obr. 14 Blokové schéma modelu predikčně kompenzačního řízení s nezávislými vstupy .....	29
Obr. 15 Blokové schéma modelů pilotů .....	30
Obr. 16 Odezva modelů pilotů na jednotkový skok .....	31
Obr. 17 Odezvy modelů člověka na jednotkový puls – proměnný parametr $T_2$ [6].....	32
Obr. 18 Histogram jízd v tunelu Strahov [16] .....	33
Obr. 19 Histogram jízd na silnici [16].....	33
Obr. 20 Pákový ovladač typu Joystick [26].....	36
Obr. 21 Blokové schéma zpracování výstupu ovladače Joystick.....	36
Obr. 22 Ukázka grafu k porovnání signálů operátorem .....	38
Obr. 23 Volba vstupního signálu.....	39
Obr. 24 Schéma soustavy vozidlo s pohonem zadních kol .....	41
Obr. 25 Graf zobrazující trajektorii automobilu .....	42
Obr. 26 Graf zobrazující velikosti doby kroků simulace .....	43
Obr. 27 Výstup modelu - přenosová funkce 1 .....	45
Obr. 28 Výstup modelu - přenosová funkce 1 s integrátorem .....	46
Obr. 29 Výstup modelu - přenosová funkce 1 s integrátorem, vstupní signál náhodný .....	47
Obr. 30 Výstup modelu - automobil , vstupní signál náhodný .....	48

## Seznam tabulek:

Tab. 1 Parametry přenosových funkcí modelů pilotů [6] .....	30
Tab. 2 Přenosové funkce soustav typických pro letectví a automobilismus [4].....	39
Tab. 3 Hodnoty parametrů - přenosová funkce 1 .....	45
Tab. 4 Hodnoty parametrů - přenosová funkce 1 s integrátorem .....	46
Tab. 5 Hodnoty parametrů - přenosová funkce 1 s integrátorem, vstupní signál náhodný .....	47
Tab. 6 Hodnoty parametrů pro soustavu automobil, vstupní signál náhodný .....	48
Tab. 7 Hodnoty parametrů modelu Pilot B při regulaci automobilu, vstupní signál náhodný ...	49

# 1 ÚVOD

Lidské chování, rozhodování a schopnost předvídat a řídit děje jsou předmětem vědeckého zkoumání. Na jejich základech se navrhuje design přístrojů a ovladačů, tak aby byl člověk schopen podávat při řízení vyšší výkony a nedopouštěl se chyb.

Neexistuje obecný model lidského operátora. Všechny modely byly odvozeny a zjednodušeny pro konkrétní úkol, který má operátor řešit. Existují modely člověka jako řidiče vozidla sledujícího vozidlo před sebou, řidiče, který sleduje středovou čáru na silnici, modely popisující chování člověka při předjíždění a řešení dopravních situací. Dále byly vypracovány modely člověka při pilotování letounu. Existuje velké množství dalších modelů, popisujících chování systému člověk-stroj.

Při hledání modelu lze na člověka pohlížet ze dvou různých pohledů. Můžeme jej zkoumat z fyzikálního hlediska nebo zkoumat jeho schopnost myslet. Je snahou nalézt i modely sjednocující oba pohledy nebo alespoň namodelovat vzájemné interakce mezi nimi. Příkladem takového modelu je například osoba řídící automobil, která kromě ovládání rychlosti a jeho směru musí také řešit dopravní situace.

Jsou popsány modely svalů, jejich rozsah a přesnost pohybu. Taktéž je známa rychlost šíření nervových vzruchů.

Člověk je ve své schopnosti řídit děje naprosto výjimečný. Dokáže se rychle adaptovat na změny systému, získávat zkušenosti a učit se. Kromě toho, dokáže díky myšlení předvídat chování systému na akční zásah. Díky čemuž je jedním z nejbezpečnějších regulátorů. Na rozdíl od strojů má člověk tu nepříjemnou vlastnost, že jeho schopnosti nepříznivě ovlivňuje únava a nepozornost.

## 2 LIDSKÝ OPERÁTOR

V současné době je často diskutovanou otázkou bezpečnost strojů řízených lidským operátorem. Ať už se jedná o automobilismus, letectví nebo průmysl. Všude je selhání člověka příčinou vážných nehod, které se bohužel často neobejdou bez ujmy na zdraví řidičího operátora či jiných osob. Mnoho vědeckých prací je věnováno tomu, jak z řízení lidský faktor zcela vynechat nebo alespoň jak sledovat a vyhodnotit jeho počínání. Velké množství nehod se stane právě kvůli snížení schopnosti člověka správně reagovat na podněty vinou únavy nebo vlivem alkoholu či jiné návykové látky. Tyto systémy se nazývají systémy pro monitorování pozornosti řidiče - DAM (*Driver Alertness Monitoring*) a DSC (*Driver Status Monitoring*) – systémy monitorování stavu řidiče.

Trendem moderní doby je úlohu řízení co možná nejvíce zjednodušit, aby se člověk mohl plně věnovat jiným problémům, jako je například řešení dopravních situací. Je snahou přenést co nejvíce těchto úloh na stroj. Proto vznikají různé asistenční systémy. U automobilů jsou známy systémy ADAS (*Advanced Assistance System*).

### 2.1 Druhy řízení a regulace

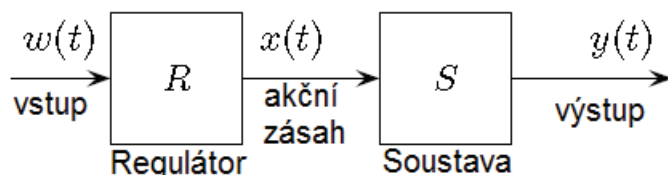
Kromě běžných metod odvození nelineárních modelů byly použity i nervové sítě a fuzzy systémy. Výsledné modely byly příliš komplikované a nebyl v nich vidět záměr řízení. Když se na úlohu řízení podíváme podrobněji, vidíme, že se jedná o sérii jednoduchých akcí sledujících určitý cíl. Není tedy třeba se zabývat složitými komplexními modely. Je vhodné si úlohu rozdělit na více částí a jednotlivé snahy splnit tyto pod-úlohy modelovat jako lineární systémy či lineární systémy s dopravním zpožděním. Tyto modely jsou sice zjednodušující, ale za předpokladu že se budeme pohybovat v určitých mezích, celkem dobře a hlavně viditelně popisují chování člověka jako regulačního členu.

#### 2.1.1 Přímé řízení – řízení v otevření smyčky

Jedná se o řízení bez zpětné vazby. Při řízení nedostává regulační člen žádnou informaci o tom, jaký vliv na soustavu mají jeho akční zásahy. Takto lze realizovat pouze ovládací člen, který má neměnné parametry a který ovládá soustavu, u níž je jistota, že nedojde k její změně. Zcela jistě toto řízení nelze aplikovat na člověka, protože ten očekává, že bude schopen přizpůsobit své řízení projevům soustavy. K přijímání signálů z ní využívá své smysly.

Princip přímého řízení můžeme zobrazit pomocí blokového schématu Obr. 1. Regulátor  $R$  přijímá vstupní žádanou hodnotu  $\omega(t)$  a reaguje na ni akčním zásahem  $x(t)$ .

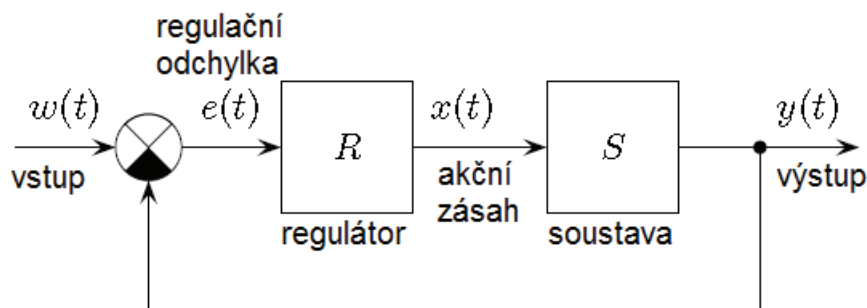
Akční zásah vstupuje do řízené soustavy  $S$ , kde vyvolá změnu jejich stavů. Tyto stavy jsou výstupem soustavy  $y(t)$ .



Obr. 1 Schéma řízení

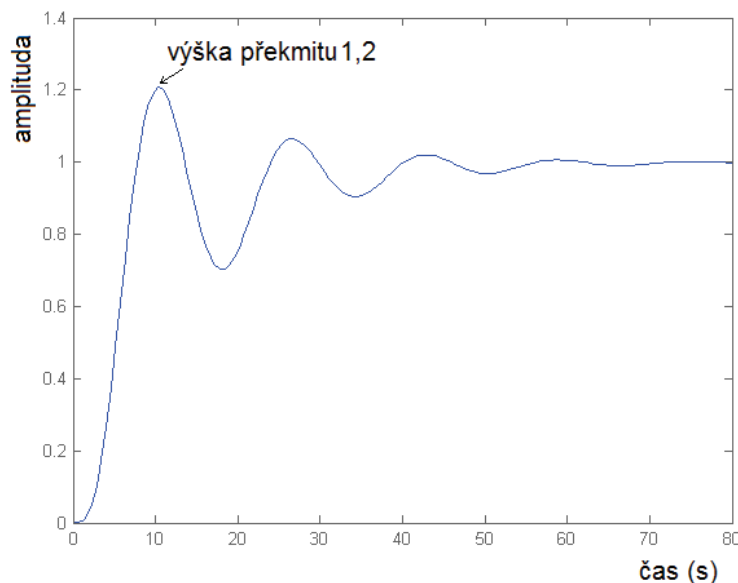
## 2.1.2 Kompenzační řízení

Tento model (Obr. 2) vyjadřuje snahu regulátoru dosáhnout na výstupu požadované hodnoty. Systém se skládá ze vstupu a výstupu, systému, regulačního členu (tj. člověka) a záporné zpětné vazby pomocí níž se porovnává vstup a výstup. Regulátor  $R$  má za úkol vysílat na soustavu takové akční zásahy  $x(t)$  na řízený systém  $S$ , aby minimalizoval rozdíl mezi vstupem  $w(t)$  a výstupem  $y(t)$ . Tento rozdíl se nazývá regulační odchylka  $e(t)$ .



Obr. 2 Schéma regulace

Kvalita regulátoru se posuzuje z dynamických vlastností tohoto rozdílu. Dobře měřitelná je odezva řízení na jednotkový skok. Na vstup systému, který byl v ustáleném stavu, přivedeme signál, který se skokově přepne z hodnoty nula na jedničku. Sleduje se výška překmitu amplitudy a doba, za kterou se systém ustálí na hodnotě jedna.



**Obr. 3 Příklad odezvy na jednotkový skok**

K vyhodnocení kvality regulačního děje v simulačních modelech můžeme využít některé z integrálních kritérií.

- Kvadratické integrální kritérium pro hodnocení velikosti regulační odchylky  $e(t)$
- Kvadratické integrální kritérium pro hodnocení velikosti akčních zásahů  $x(t)$
- Integrální kritérium ITAE pro hodnocení velikosti regulační odchylky  $e(t)$

Tento model je však zbaven lidské schopnosti uvažovat. Myšlení se projevuje pouze jako změna parametrů regulátoru. Cílem člověka je zlepšit regulační schopnost či se adaptovat na změny systému, protože jak víme, parametry systému se mohou měnit v závislosti na okolních podmínkách. Tato vlastnost se však obtížně modeluje, proto budeme předpokládat, že systém bude v průběhu vyhodnocování stabilní. A to jak ze strany regulované soustavy, tak i od regulačního členu. Tudíž nebude na člověka působit únavový faktor a další vlivy ovlivňující jeho schopnost řídit.

Nejvíce zkoumaným jevem je stabilita uzavřené smyčky zpětnovazebního řízení, neboli jestli se po odstranění vstupního signálu vrátí systém do nulové hodnoty. Z tohoto hlediska rozlišujeme systémy

- Stabilní
- Nestabilní
- Na mezi stability

Nestabilní systém může být velmi nebezpečný, je důležité zajistit, aby regulátor svoji úlohu dobře zvládal a systém se do tohoto stavu nikdy nedostal.

## 2.2 Modely člověka

Jedná se o modely, u kterých bylo cílem prozkoumat, jak člověk řeší problémy a snaží se dosáhnout stanovených cílů. Součástí těchto modelů nezdědka bývá další model reprezentující řízenou soustavu. Například model popisující chování vozidla, který vychází přímo z fyzikálních zákonů.

### 2.2.1 Fyziologický model člověka

Schopnost člověka řídit a ovládat stroje je omezena jeho schopnostmi vycházejícími z biologické podstaty a podléhající fyzikálním zákonům.

Například vnímání světla lidským okem je omezeno na určitý rozsah frekvencí, vnímaných jako barvy. Taktéž schopnost rozlišit mezi dvěma velice blízkými frekvencemi není nekonečná. Omezuje ji rozlišovací schopnost. Tyto a další omezení působí už při vnímání signálů z okolí. Možná právě proto se stane skoro polovina všech těžkých nehod v noci nebo při stmívání, i když na noční hodiny připadá pouze pětina ujetého počtu kilometrů [12].

Schopnost mozku reagovat na podnět také zabere určitý čas. A protože přenos signálu nervovými vzruchy neprobíhá okamžitě, vzniká jakási prodleva mezi signálem a jeho odezvou, určitý reakční čas. V důsledku toho je v atletice přijato pravidlo, že pokud někdo odstartuje do 0,10 sekundy po zaznění startovního výstřelu, bere se to jako ulitý start.

Dalším limitem omezujícím schopnost provádět adekvátní akční zásahy spočívá ve svalech. Jejich funkce byla již dobře vědecky popsána.

### 2.2.2 Člověk z pohledu psychologie

Častým předmětem výzkumu jsou faktory ovlivňující běžnou funkci mozku. Patří sem teorie popisující schopnost myslet, působení stresu a podobně. Například sem patří výzkum toho, jak se mění obtížnost úkolu, pokud při jeho plnění budeme konat ještě další činnosti. Zajímavá je studie Strayera a jeho kolegů o vlivu konverzace přes mobilní telefon na řízení automobilu.[11] Podle jejich závěrů není hlavním problémem to, že řidič drží mobilní telefon v ruce, ale to že hovor odvádí řidičovu pozornost od řízení.

Dalším podstatným problémem je subjektivita ve vyhodnocování informací. Například rychlost 50 km/h vnímá cyklista velmi intenzivně, zatímco řidič automobilu je izolován od okolí čelním sklem a připadá mu, že jede velmi pomalu.

Zobrazení činnosti mozku není snadné. Mnohdy se měří vedlejší efekty doprovázející zvýšenou mozkovou činnost, například tep srdce. Naštěstí věda dělá pokroky i v této oblasti. Pomocí *elektroencefalografie* (EEG) jsme schopni měřit

frekvence mozkových vln. Dokonce už existují první zařízení, které umí tyto vlny rozluštit a lze tak vysílat informace počítači pouze pomocí myšlenek.

### **2.2.3 Fyzikální modely**

Snahou těchto modelů je popsat vzájemné interakce mezi člověkem a okolím. Lze pomocí nich popsat bezpečnost a efektivnost plnění úkolu řízení.

### **2.2.4 Ergonomické modely**

Jejich cílem je zjistit, jak co nejvíce člověku usnadnit ovládání. Jedná se zejména o rozmístění signalizačních a ovládacích prvků tak, aby se zlepšila přesnost vykonávaných úkonů a ovládání bylo co možná nejvíce intuitivní. Rozmístění přístrojů by mělo být i dostatečně pohodlné, tak aby člověk nemusel odvracet svoji pozornost od vykonávání svého úkolu.

### **2.2.5 Modely řízení**

Tyto modely mají zjistit, jak si člověk povede při řešení dopravních situací. V potaz se bere tvar křižovatek, dopravní značení, předpisy, ale také vozidla a jiné objekty. Cílem je nasimulovat chování řidiče nebo pilota a odhadnout jeho reakce na podněty.

Model musí brát ohled na fyzikální schopnosti člověka a omezení. K popisu se využívají řídicí systémy vyšších řádů. Problematiku řízení je možné rozdělit do částí:

- Řízení příčné
- Řízení podélné



## 3 MODELÝ ŘÍZENÍ

### 3.1 Podélné řízení

Anglickým ekvivalentem podélného řízení je *longitudal control*. Při tomto řízení je úkolem řidiče sledovat vozidlo jedoucí vpředu. Člověk řídí podélnou složku vektoru rychlosti tak, aby se pohyboval v požadované vzdálenosti za vedoucím autem. Dynamika řízení je silně závislá na okolních podmínkách, jako je hustota provozu nebo třeba námraza. Zkoumání chování řidičů by se mělo zaměřit na situace, kde nedochází k interakci s ostatními vozidly a chodci, není třeba řešit dopravní situace a silnice by měla být pokud možno co nejvíce rovná.

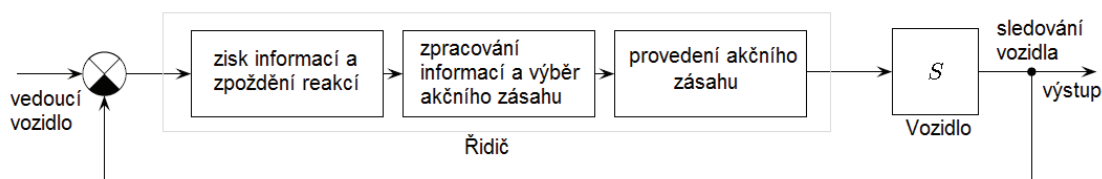
Řízení probíhá na základě vizuálního vjemu, kdy člověk přijímá informace od okolí a po vyhodnocení, které probíhá na základě zkušeností s chováním vozidla, předvídá jeho reakce na akční zásahy. Schopnost řízení člověka by se tedy dala rozebrat na několik částí.

Získání informací o situaci. Zde se nejvíce uplatní zrak. Řidič musí ze svého zorného pole získat informace o rychlosti obou vozidel, vzdálenosti mezi nimi a jejich zrychlením. Dalším důležitým zdrojem údajů je cit nervových buněk na povrchu těla. Ten poskytuje informace o směru a velikosti zrychlení automobilu.

Zpracování informace a výběr patřičného akčního zásahu. Zde se nejvíce uplatní schopnosti získané učením a zkušenosti řidičů. Bývá častou chybou začínajících řidičů to, že při dané situaci neprovedou adekvátní akční zásah. Typickým příkladem je třeba situace, kdy nezkušený řidič motorového vozidla potřebuje prudce snížit svoji rychlost a proto sešlápne brzdový pedál, jak to jen jde. Přitom se kola zablokuji a přestanou otáčet, brzdění je méně efektivní a vozidlo dostává smyk, takže řidič nemá schopnost zatáčet. Proto se v současné době montují do automobilů pomocné systémy, jako je například ABS, které brzdy odpojí v případě, že se kola přestanou točit.

Uplatnění akčního zásahu a jeho přenos na řízenou soustavu. Zde má vliv neuromotorika člověka, která se ovšem velmi rychle zlepšuje učením. Nepříznivý vliv může mít pouze špatná ergonomie ovládacích prvků.

Systém automobilu a řidiče Obr. 4, který svým vozem následuje před ním jedoucí vozidlo, lze namodelovat kompenzačním způsobem řízení. Dynamické vlastnosti řidiče jsou dány dobou zpoždění reakcí a schopnostmi získanými v průběhu učení. Akční zásah řidič provádí na pedál plynu a brzdy. Model si můžeme zobrazit pomocí blokového schématu. Řidič vnímá rozdíl mezi svým vozidlem *S* a vozidlem následovaným (*vedoucí vozidlo*). Informace zpracuje, vyhodnotí a s určitým zpožděním provede akční zásah na svém vozidle *S*.

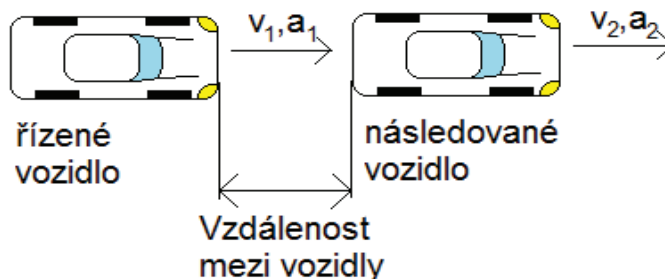


Obr. 4 Blokové schéma podélného řízení

### 3.1.1 Modely podélného řízení

Pro modelování podélného řízení lze uvažovat dvě situace. V první jede řidič s vozidlem sám a jeho úkolem je udržovat konstantní rychlost. Potom se řidič chová jako proporcionální regulátor.

Druhou situací je, když má řidič sledovat před ním jedoucí vozidlo a udržovat konstantní vzdálenost mezi nimi Obr. 5. Tato situace nastane například v koloně, kdy vozidla jedou za sebou a řidiči mezi sebou dodržují bezpečnou vzdálenost. Řidič udržuje konstantní vzdálenost mezi následovaným vozidlem jedoucím rychlostí  $v_2$  se zrychlením  $a_2$  a svým vozidlem jedoucím rychlostí  $v_1$  se zrychlením  $a_1$ .



Obr. 5 Podélné řízení - konstantní vzdálenost mezi vozidly

Od padesátých let bylo vytvořeno velké množství modelů, simulujících chování řidičů jedoucích v koloně. Tyto modely vznikaly na základě pozorování a studia dopravních situací. Vznikaly lineární modely popisující řidiče následujícího před ním jedoucí vozidlo. Řízenou veličinou je zrychlení, které se určí na základě rozdílu rychlosti řízeného vozidla a vozidla následovaného. Velikost akčního zásahu je ovlivněná proporcionální konstantou. Fyzikálním významem této konstanty je citlivost řidiče. Akční zásah se projeví s dopravním zpožděním. Tento model lze rozšířit, například citlivost řidiče může být proměnná v závislosti na rychlosti vozidla.

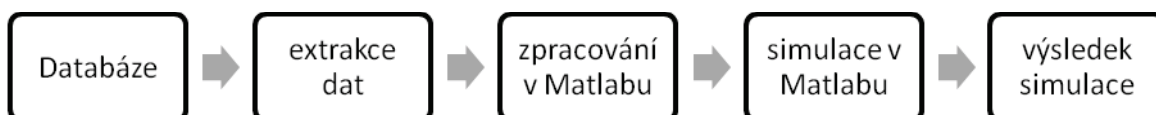
Existuje více modifikací tohoto modelu. [21] Newellův model je založen na předpokladu, že model řidiče má tendenci přibližovat se k požadované rychlosti exponenciálním trendem. Model navržený Tylerem považuje řidiče za lineárně optimální regulátor, jehož činnost je optimalizována kvadratickou funkcí četností chyb a jejich rozsahu. Později byl tento model modifikován, aby zohledňoval reakční dobu řidiče a nelinearity vozidla.

### 3.1.2 Současné metody tvorby databází

Mnoho matematických modelů, popisujících chování řidičů, nebyla nikdy ověřována v praxi. Problémem bylo, že neexistoval způsob jak získávat data. S rozvojem techniky v posledních letech se však tento problém vyřešil. Pomocí elektronických snímačů jsme schopni získat potřebná data o jízdě a následně je analyzovat. Tyto data se shromažďují v databázích, jako je SAVME Michiganské univerzity a ICC FOT databáze.[21]

SAVME (*System for Assessment of the Vehicle Motion Environment*) je projekt zaměřený na dokumentaci, jak se vozidla řízená člověkem pohybují v závislosti na jiných vozidlech při běžném provozu. V tomto projektu je zaznamenáno chování řidičů na veřejných komunikacích, takže poskytuje data důležitá pro tvorbu modelů, takových jako jsou uvedeny v této práci. Systém SAVME sbírá data tak, že s frekvencí 10 Hz pořizuje snímky z digitální kamery. Z těchto snímků se vypočítají údaje jako je rychlost, pozice (příčná i podélná) a úhel směru pohybu. Výsledky jsou uloženy ve formuláři Microsoft Access, velikost každé databáze je kolem 600 MB. Získaná data mají dobrou přesnost, blíží se přesností k radaru nebo GPS.

Pro přístup k získaným datům uloženým ve formulářích Microsoft Access se používají programy psané v jazyce Visual Basic. Ty provedou extrakci a výběr dat podle zadaných kritérií. Pro zpracování dat v programu Matlab se použijí předem vytvořené skripty, které data upraví do podoby, aby mohly být dále zpracovány v simulacích modelu řidiče.



Obr. 6 Zpracování dat z databáze

V databázi SAVME je zaznamenána poloha vozidla v souřadnicích  $x$ ,  $y$ . Hlavním zaměřením je získání informací pro tvorbu modelu v případě že řidič následuje vozidlo jedoucí před ním. Do této databáze se nezahrnují situace, kdy řidič přejíždí z pruhu do

pruhu. K databázi je připojen program, který odfiltruje chybné údaje, kdy si ujetá vzdálenost a rychlost neodpovídají pomocí numerického výpočtu RMS (root-mean-square) chyby.

Aby bylo možné sledovat činnost inteligentních jízdních systémů v běžných podmínkách, vyvinula Michiganská Univerzita databázi a systém ICC-FOT (*Intelligent Cruise Control Field Operational Test*). 108 dobrovolníků se v průběhu dvou až pěti týdnů podílelo na měření jejich schopnosti řízení vozidla. K měření byl použit infračervený laser s paprskem směřovaným v rozsahu dva stupně do šíře a 137 metrů do dálky a paprsek směřovaný 7 stupňů do šíře a na vzdálenost 32 metrů. Situace, kdy řidič následoval před ním jedoucí vozidlo, byla zaznamenána údaji o čase, vzdálenosti vozidel, rychlosti a úrovni sešlápnutí pedálů.

### 3.1.3 Vytvoření modelu

Z dat o řízení skutečného řidiče se vytvoří vzor, který je dostatečně bohatý a má dostatek stupňů volnosti, tak aby dobře popsal chování skutečných řidičů s dostatečnou přesností.

Pokud bere řidič v úvahu pouze vzdálenost mezi vozidly, lze jeho řízení namodelovat jako proporcionální člen  $K$  s dopravním zpožděním  $T_D$ . Velikost tohoto zpoždění bude daná součtem reakční doby, času, který zabere vyhodnocení situace a času než dojde k provedení akčního zásahu. Přenosovou funkci můžeme vyjádřit ve tvaru:

$$Y(p) = K \cdot e^{-T_D p} \quad (3-1)$$

$K$  - řidičovo zesílení (citlivost)  
 $T_D$  - dopravní zpoždění

Pokud ovšem zná řidič svoji rychlost  $v_1$  a zrychlení  $a_1$ , odhadne rychlost  $v_2$  a zrychlení  $a_2$  sledovaného vozidla a odhadne vzdálenost  $\Delta Y$  mezi vozidly, lze sledování popsat pomocí následujícího vztahu 5-2, jako řízení zrychlení vozidla. Tento model je lineární. Doba zpoždění reakcí řidiče je  $T_D$ .

$$a_1(t) = \frac{b}{\Delta Y(t - T_D)} (v_2(t - T_D) - v_1(t - T_D)) \quad (3-2)$$

Přesnější je však popis pomocí nelineárního modelu. Nejznámější je nelineární model General Motors (NGM model). Zrychlení sledujícího vozidla  $a_1$  je úměrné součinu jisté mocniny rychlosti  $v_2$  vozidla jedoucího vpředu, rozdílu rychlostí obou vozidel a

nepřímě úměrné vzdálenosti  $\Delta Y$  mezi vozidly. Parametry  $\alpha, \beta, \gamma$  se stanoví empiricky. Doba zpoždění reakcí řidiče je  $T_D$ .

$$a_1(t) = \alpha \frac{v_2(t)^\beta}{\Delta Y(t - T_D)^\gamma} (v_2(t - T_D) - v_1(t - T_D)) \quad \text{NGM model (3-3)}$$

Rovnice lineární optimální řízení – Taylorův model

$$u(t) = C_v(v_2 - v_1) + C_s[(s_2 - s_1) - C_c \cdot V_F] \quad \text{Taylorův model (3-4)}$$

$$a = 2[V(\Delta x) - v] \quad \text{Lineárně optimální regulátor (3-5)}$$

$$V(\Delta x) = V_0 [\tanh m(\Delta x - b_f) - \tanh m(b_c - b_f)] \quad \text{Newellův model (3-6)}$$

Při vytváření svého modelu vycházel analogií z rovnice pohybu plynu.

$$v_1(t) = V_1 \left[ 1 - e^{-\lambda_1 v_1^{-1} (x_2(t-\Delta) - x_1(t-\Delta) - d_1)} \right] \quad \text{Pohyb plynu (3-7)}$$

### 3.1.4 Gippsův model

Cílem tohoto modelu je zahrnout i další podmínky ovlivňující chování řidiče. Uvedený vztah je modifikovaný Gippsův model, obsahuje úpravy, které zlepšují jeho stabilitu. Výstup z modelu se skládá ze dvou rovnic. První reprezentuje řidičovu snahu dodržovat požadovanou rychlost. Druhá rovnice vyjadřuje udržování bezpečné vzdálenosti, tak aby ani v případě, že vedoucí vozidlo začalo prudce brzdit, nedošlo ke srážce obou vozidel. Lee a Peng [21] navrhuji, aby  $b, b_n, \tau$  nebyly volitelné proměnné.

$$v_n(t + \tau) = \min \left\{ \begin{aligned} &v_n(t) + 2,5a_n\tau \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n}\right) \sqrt{0,025 + \frac{v_n(t)}{V_n}}, \\ &b_n\tau + \sqrt{b_n^2\tau^2 - b_n \left[ 2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{b} \right]} \end{aligned} \right\} \quad (3-8)$$

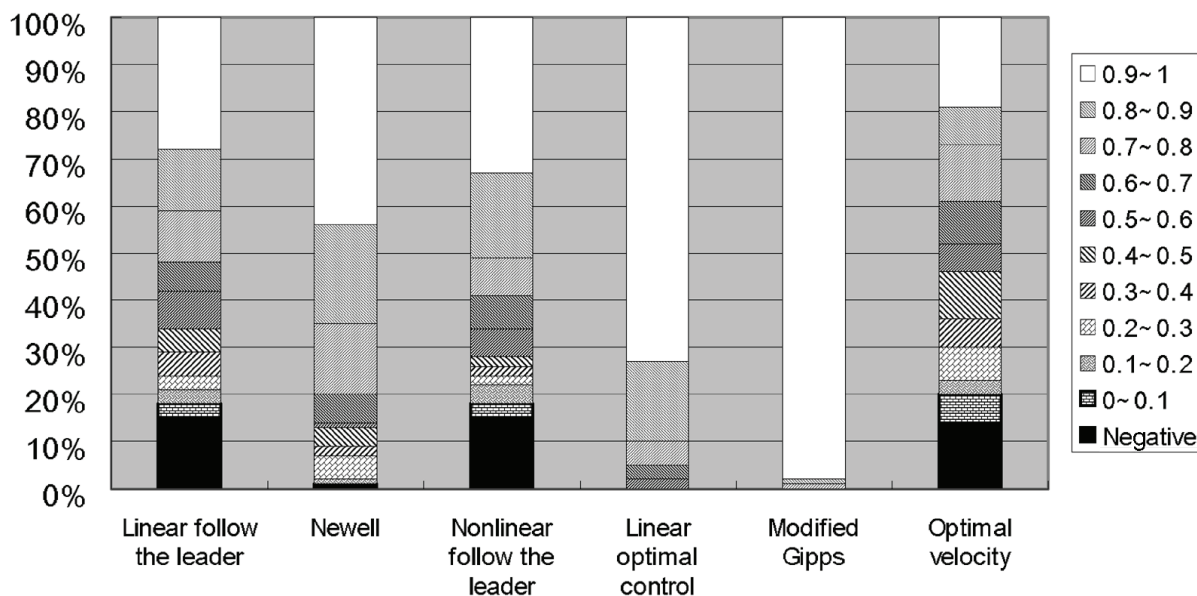
$$b_n = -2a_n, \quad b = \min \left( -3, \frac{b_n - 3}{2} \right), \quad \tau = \frac{2}{3} \text{ sekundy}, \quad s_n = 4m$$

- $a_n$  - maximální zrychlení n-tého vozidla,
- $b_n$  - maximální brzdění n-tého vozidla,
- $b$  - odhadovaná hodnota  $b_{n-1}$ ,
- $s_n$  - efektivní velikost n-tého vozidla,
- $V_n$  - žádaná rychlost n-tého vozidla,

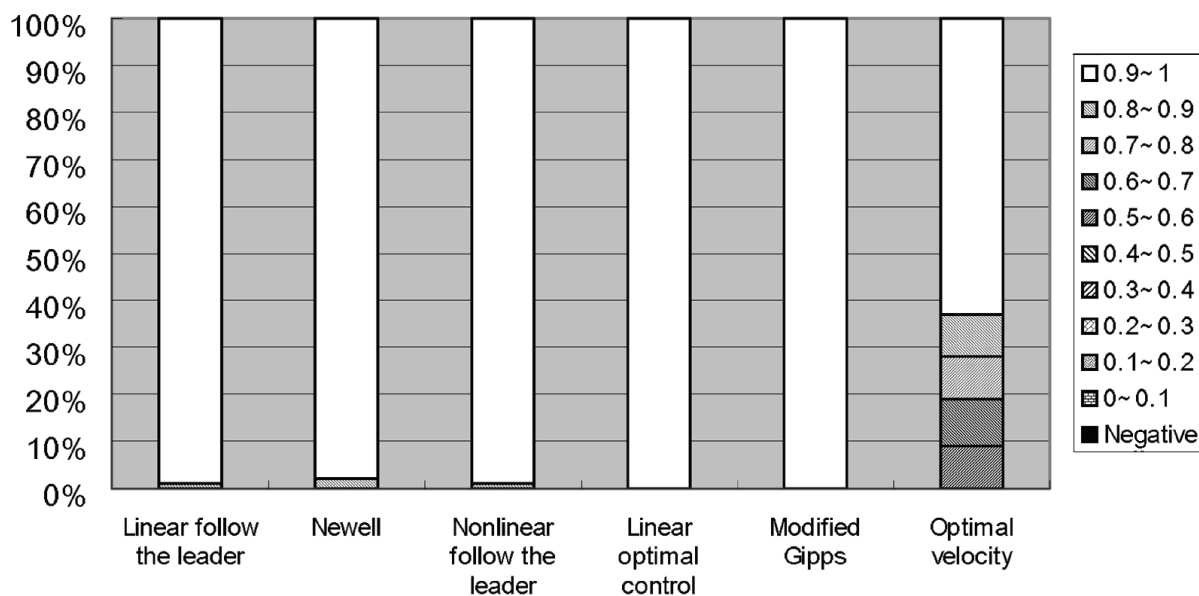
- $X_n(t)$  - pozice přední části n-tého vozidla v čase  $t$ ,  
 $v_n(t)$  - rychlost n-tého vozidla v čase  $t$ ,  
 $\tau$  - přibližná doba reakce.

Vyhodnocení těchto modelů probíhá tak, že prostředím Matlab pomocí funkce *fminsearch* nalezneme nejvhodnější parametry konstant. K identifikaci nejvhodnějších parametrů lze použít různá kritéria, často používaná je metoda nejmenších čtverců, tak aby se minimalizoval rozdíl mezi hodnotami vypočtenými z modelu a hodnotami získanými z databází. Tuto metodu je nutné opakovat s různými počátečními podmínkami. Získáme tak sadu hodnot, které budou parametry našeho modelu. Lze očekávat poměrně velký rozptyl hodnot, protože každý identifikovaný řidič je jiný.

Na obrázcích Obr. 7 a Obr. 8 (převzato z], str. 9) je zobrazena procentuální míra toho, jak moc uvedené modely odpovídají datům získaným z databází ICC-FOT a SAVME.



Obr. 7 Vzájemná úměra modelů a dat ICC-FOT [21]



Obr. 8 Vzájemná úměra modelů a dat SAVME [21]

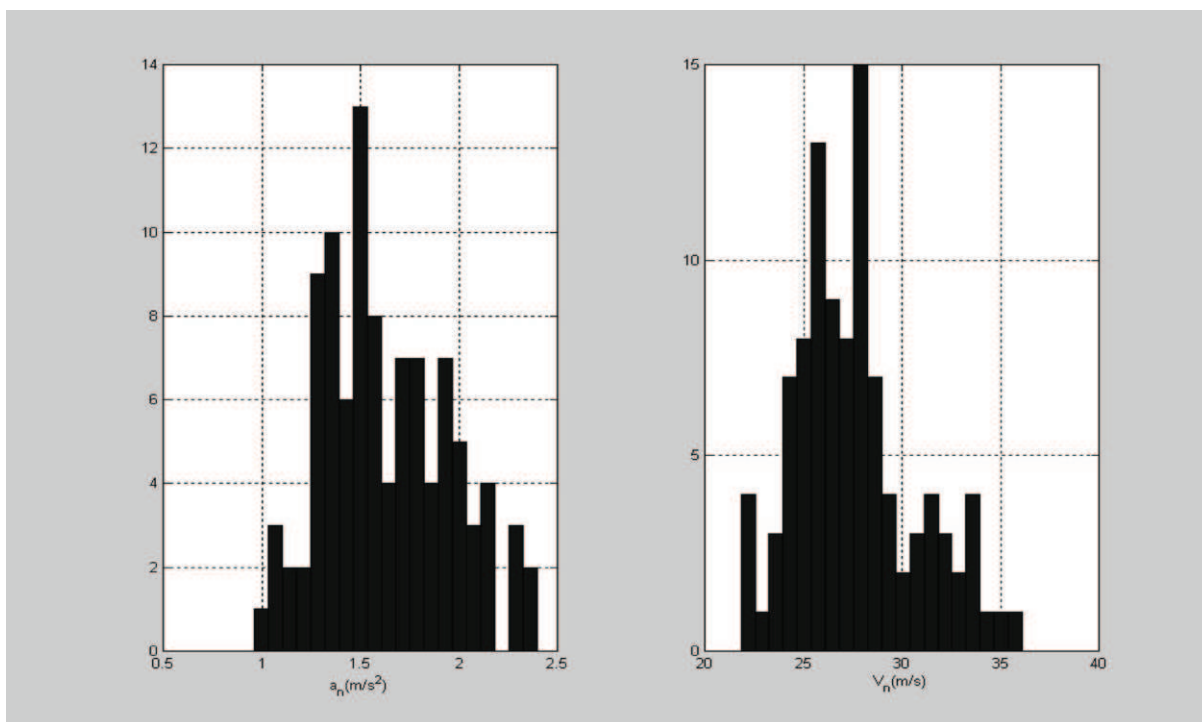
Nejlépe přizpůsobivý je Gippsův model, jak je vidět v Obr. 7 a Obr. 8. Jeho výsledky nejvíce odpovídají výchozím datům. Data z ICC-FOT tvoří sekvence obvykle delší než 100 sekund. Proto není možné vždy vytvořit model, který by zcela odpovídal po celou dobu řízení. Sekvence dat ze SAVME naopak nebývají delší než 15 vteřin a proto je mohou modely snadněji nasimulovat. Navíc byly data SAVME ručně vybrána, tak aby se dala považovat za správná.

Podle závěrů Lee a Penga [21] většina modelů dobře simuluje data správná, ale už si nedokáže dostatečně dobře poradit s případy, kdy se v nasbíraných datech objeví chyby. Navrhují používat Gippsův model, protože je mnohem robustnější, co se týče špatných dat a obsahuje jen dvě volitelné proměnné, takže lze snadněji implementovat.

Parametry  $a_n$  a  $V_n$  tedy maximální velikost zrychlení a žádaná rychlost řízeného vozidla zůstaly jako volitelné. Na základě analýzy dat ICC-FOT, které zahrnují více jak 50 hodin dat o řízení a tvoří je záznamy jízdy stovky řidičů, byly několikrát vypočteny tyto dva parametry charakterizující různé typy chování řidičů.

Četnost vypočtených parametrů maximální zrychlení  $n$ -tého vozidla  $a_n$  a žádaná rychlost  $n$ -tého vozidla  $V_n$  je znázorněna grafy na obrázku Obr. 9 (převzato z [21], str. 11).





Obr. 9 Četnost vypočtených parametrů Gippsova modelu z dat ICC-FOT [21]

Získané modely lze použít pro simulaci dopravních situací. Lze jimi tak předvídat například vznik kolon v místech, kde je snížena maximální rychlost.

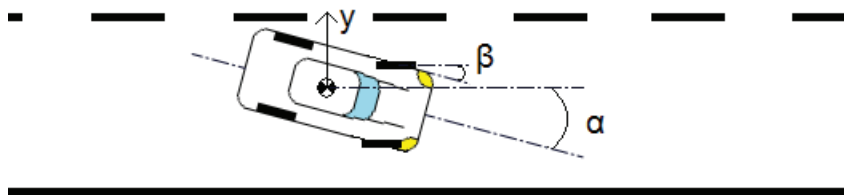
V současné době mnoho výrobců automobilů přidává do vozidel asistenční systémy. Jedním z nich je i adaptivní tempomat. Jeho funkcí je monitorovat dopravní situaci před vozidlem a udržovat konstantní rychlost.

### 3.2 Příčné řízení

Anglický ekvivalent příčného řízení je *lateral control*. Při jízdě autem se nazývá zatáčení. Úkolem řidiče je držet se při jízdě v jednom pruhu. Ten musí sledovat zatáčky a vyhnout se rizikům spojených s jejím projížděním. Tento druh řízení člověk vykonává kompenzačním způsobem. Porovnává svoji aktuální pozici a úhel natočení vozidla  $\alpha$  s požadovanou změnou směru jízdy vozidla. Řidiče zajímá především vzdálenost od krajnice a od středu vozovky  $y$ . Akčním zásahem je zde natočení volantu, které mění úhel natočení kol vozidla  $\beta$ .

Osoba řídící vozidlo získává informace o své pozici pomocí zrakového vjemu. Údaje o velikosti a směru zrychlení sbírá díky citlivým nervovým zakončením na povrchu těla.





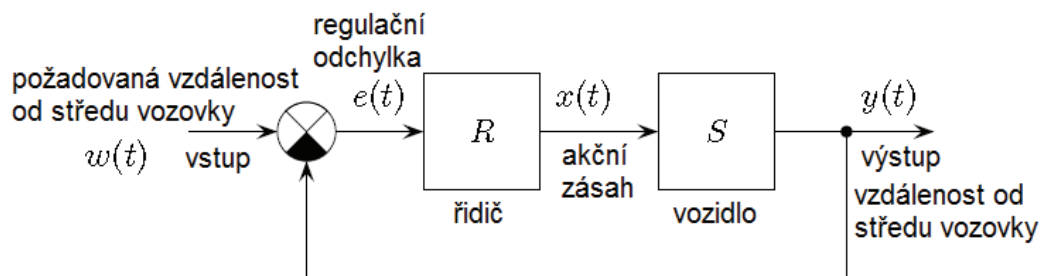
- $\alpha$  úhel směru vozidla
- $\beta$  úhel natočení kol
- $y$  vzdálenost od středu vozovky

Obr. 10 Příčné řízení - jízda v jednom pruhu

Do problematiky příčného řízení spadá mnoho dalších typů řízení. Například mohou uvést manévr předjíždění, změnu směru jízdy, parkování. Pro popis těchto situací by bylo třeba použít složitějších modelů, u kterých však není snadné stanovení parametrů lidského regulátoru. Problematiku změny jízdního pruhu rozebírá Dirk Ehmanns viz [15].

### 3.2.1 Modely příčného řízení

Nejčastěji se příčné řízení modeluje pomocí kompenzačních modelů Obr. 11, protože je v řízení dominantní kompenzační složka. Jedná se tedy o modely vycházející z obecného modelu pro kompenzační řízení (Obr. 2), kde regulátor srovnává požadovanou hodnotu  $\omega(t)$  se zpětnou vazbou na současnou polohu  $y(t)$  jeho vozidla. Řidič se snaží, dosáhnou takového stavu, aby odchylka obou hodnot  $e(t)$  byla co nejmenší, nejlépe nulová. To mu umožňuje akční zásah  $x(t)$ , který je v tomto typu řízení úhlem natočení volantu. Ten má za následek vychýlení kol vozidla o úhel  $\beta$  oproti středové ose vozidla. Pro změnu úhlu natočení celého vozidla  $\alpha$  je třeba, aby se vozidlo pohybovalo. Pokud bude vozidlo v klidu, natočení volantu nebude mít žádný vliv na jeho pozici na vozovce.



Obr. 11 Blokové schéma příčného řízení

### 3.2.2 Přenosové funkce řidiče

Řidiče můžeme popsat pomocí diferenciálních rovnic a operátorového přenosu. Jeho parametry lze stanovit experimentálně. Je třeba ale počítat s tím, že každý člověk je individuální jedinec s jinou schopností řídit. Navíc je tato schopnost ovlivněna mnoha faktory, jako například únava či stres.

Při tvorbě modelu vycházíme z toho, že se řidič snaží kompenzovat regulační odchylku  $e(t)$ . Vysílá proto akční zásahy  $x(t)$  směrem k regulované soustavě, tedy vozidlu.

Pro popis chování člověka můžeme vyjít z přenosové funkce PID regulátoru  $Y(p)$  (3-9), který obsahuje složky proporcionální, integrační i derivační. Proporcionální složka je zastoupena zesílením  $K$ . Vlastnosti PID regulátoru dále charakterizuje integrační konstanta  $T_i$  a derivační konstanta  $T_d$ .

$$Y(p) = K \left[ 1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right] \quad (3-9)$$

Tento model není příliš vhodný, zejména protože v něm není zahrnuto dopravní zpoždění, které u člověka vzniká mezi vnímaným podnětem a reakcí na něj. Mnohem vhodnější je použití kompenzačního modelu řidiče, který má integrační charakter a zahrnuje i dopravní zpoždění  $T_D$ .

$$Y(p) = \frac{K}{p} \cdot e^{-T_D p} \quad (3-10)$$

Další model, který lze pro modelování člověka v příčném řízení použít, byl popsán anglickým vědcem Arnoldem Tustinem, který se zabýval vlastnostmi lidského regulátoru ve zpětnovazebním manuálním řízení. Později byl tento model používán pro vytvoření autopilotů americkým vědcem Mc Ruerem, jenž přiřadil časovým konstantám fyziologický význam.

$$Y(p) = \frac{K \cdot e^{T_D p} (T_a p + 1)}{(T_n p + 1)(T_I p + 1)} \quad (3-11)$$

- K - konstanta reprezentující zvyklosti řidiče,
- $T_D$  - dopravní zpoždění mezi očním vjemem a odezvou mozku,
- $T_I$  - zpožďující setrvačná konstanta související s prováděním naučených stereotypů,
- $T_n$  - setrvačná konstanta udávající zpoždění dané neuromuskulárním systémem,
- $T_a$  - prediktivní konstanta závislá na zkušenosti řidiče.

Kompenzační model řízení je možné popsat i přenosem odpovídajícím proporcionálně derivačnímu regulátoru s dopravním zpožděním skládajícím se ze dvou částí. První částí je zpoždění vyhodnocení informace a druhou je zpoždění vzniklé neuromuskulárním systémem. Tento model dobře popisuje řízení, kde je regulační odchylka  $e(t)$  velmi malá, ale je vhodný pro popis širokého spektra řidičů a vozidel s různými dynamickými vlastnostmi.

$$Y(p) = \frac{K(T_a p + 1)}{(T_I p + 1)} e^{-(T_D + T_n)p} \quad (3-12)$$

- K - konstanta reprezentující zvyklosti řidiče,
- $T_a$  - prediktivní konstanta závislá na zkušenosti řidiče,
- $T_I$  - zpožďující setrvačná konstanta související s prováděním naučených stereotypů,
- $T_D, T_n$  - dopravní zpoždění zahrnující vyhodnocení vjemu a zpoždění neuromuskulárního systému.

Výše uvedené modely jsou lineární. V praxi se však v systémech člověk - stroj objevuje celá řada nelinearit. Složitější modely mnohem lépe popisují chování skutečných řidičů, ale problémem zůstává identifikace jejich parametrů.

### 3.2.3 Prediktivní modely

Při řízení člověk používá přibližný odhad chování vozidla, tedy provede takový akční zásah  $x(t)$ , aby se mu v budoucnu podařilo regulační odchylku  $e(t)$  vyregulovat. Takové modely se nazývají prediktivní, neboli modely „*preview*“.

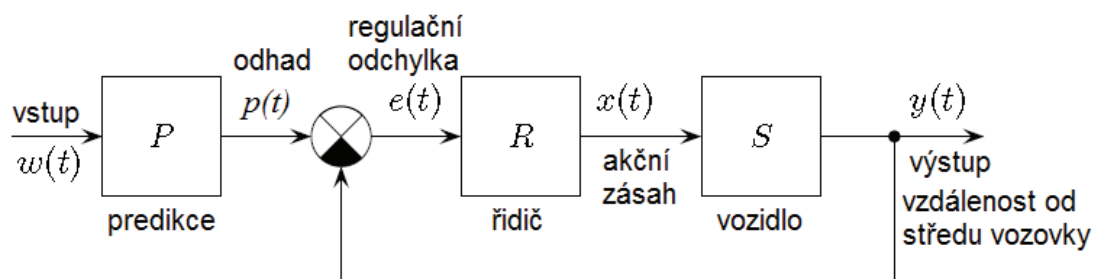
Velký vliv má zde to, jak moc je daný řidič seznámen s vozidlem. Během jízdy je schopnost odhadu omezena dohledem. K jeho snížení dochází například před nepřehlednou zatáčkou.

Prediktivní řízení Obr. 12 probíhá velmi podobně jako kompenzační řízení. Člověk se snaží akčními zásahy  $x(t)$  vynulovat regulační odchylku  $e(t)$ . Rozdílem je však, že řidič má k dispozici hodnoty požadované veličiny  $\omega(t)$  i do budoucna. Prediktivní schopnost lze namodelovat jako přenosovou funkci  $P(p)$ .

$$P(p) = e^{T_p p}$$

Prediktivní řízení (3-13)

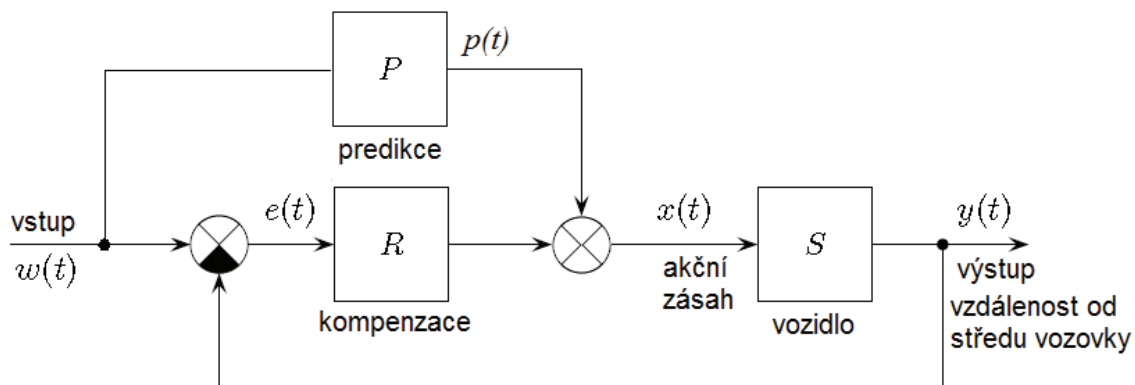
$T_p$  - konstanta určující míru predikce



Obr. 12 Blokové schéma příčného řízení s predikcí

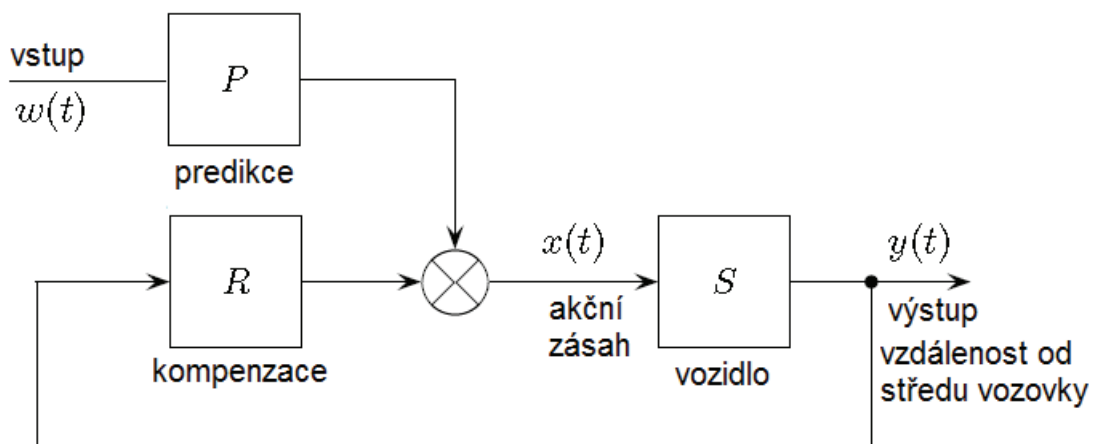
Modely ve kterých řidič předvídá budoucí trajektorii svého vozidla, se hodí k popisu situací, kde dochází k velkým změnám příčných zrychlení vozidla. Ty nastávají například při průjezdu vozidla zatáčkou či při provádění manévru předjíždění.

Ve skutečnosti řidič používá oba typy řízení zároveň. Kompenzuje svoji aktuální polohu  $y(t)$  a zároveň předvídá budoucí trajektorii svého vozu. To dává vzniknout prediktivně kompenzačnímu modelu řízení, anglicky označovaného jako „Pursuit Tracking Model“ - Obr. 13.



Obr. 13 Blokové schéma modelu prediktivně kompenzačního řízení

Model prediktivně kompenzačního řízení lze modifikovat tak, aby řidič získával odděleně údaje o své aktuální poloze  $y(t)$  a požadovanou trajektorii  $w(t)$ , jež se snaží předvídat.



Obr. 14 Blokové schéma modelu predikčně kompenzačního řízení s nezávislými vstupy

### 3.2.4 Modely pilotů

Ve zdrojích[6],[7] se zkoumají vlastnosti modelů člověka jako jeho náhrady v simulaci řízení letounu. Pro získání požadovaného charakteru letu využívá pilot tři různé typy regulátorů.

**Prediktivní regulátor** – udržuje režim letu na základě informací získaných ze zrakového pole a pocitových vjemů

**Zpětnovazební regulátor** – tvoří jej vizuální informace a pocitové vjemy vzhledem k požadovanému režimu letu

**Prekognitivní regulátor** – vyvolá z paměti naučený manévr.

Za matematický model pilota pro účely simulace můžeme považovat lineární model s dopravním zpožděním. Jeho přenosová funkce je  $F(p)$ .

$$F(p) = K \frac{(T_3 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} e^{-T_D p} \quad \text{pilot A (3-14)}$$

- $K$  - přírůstek síly na kormidlech ve vztahu k jejich odchylce (1 až 100),
- $T_1$  - reakční časová konstanta, schopnost reagovat na změny vstupního signálu (5 až 20 s) (prediktivní časová konstanta),
- $T_2$  - dynamické vlastnosti výkonových členů pilota (0,1 až 0,2 s) (neuromuskulární časová konstanta),
- $T_3$  - integrační časová konstanta, schopnost pilota realizovat proměnné činnosti (0,2 až 1s),
- $T_D$  - dopravní zpoždění (0,1 až 0,4 s) - reakční doba pilota.

Vypuštění setrvačného členu  $T_1$  dostaneme zjednodušenou přenosovou funkcí známou jako Grossův model dynamiky člověka.

$$F(p) = K \frac{(T_3 p + 1)}{(T_2 p + 1)} e^{-T_D p} \quad \text{pilot B (3-15)}$$

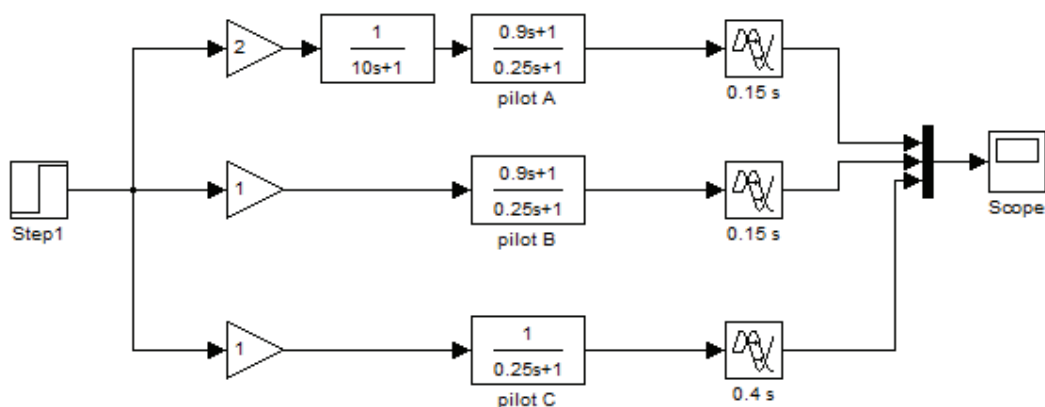
Pokud budeme model člověka chtít ještě více zjednodušit a oprostit jej od integrací a derivací vstupního signálu, získáme zjednodušený model pilota.

$$F(p) = \frac{K}{(T_2 p + 1)} e^{-T_D p} \quad \text{pilot C (3-16)}$$

Uvedené modely pilotů jsem implementoval do prostředí Matlab/Simulink Obr. 15. Parametry modelů jsem zvolil následující.  $T_{1,2,3}$  jsou pro všechny piloty stejné.

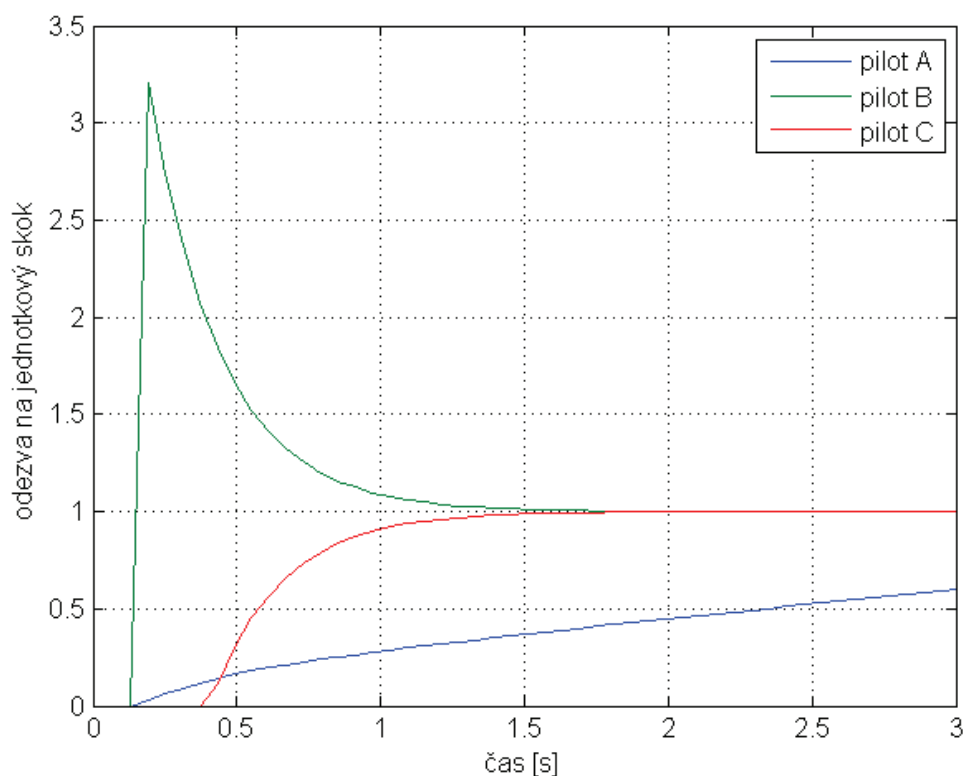
**Tab. 1 Parametry přenosových funkcí modelů pilotů [6]**

	Pilot A	Pilot B	Pilot C
$T_1$ [s]	10	10	10
$T_2$ [s]	0,25	0,25	0,25
$T_3$ [s]	0,9	0,9	0,9
$K$ [-]	2	1	1
$T_D$ [s]	0,15	0,15	0,4



**Obr. 15 Blokové schéma modelů pilotů**

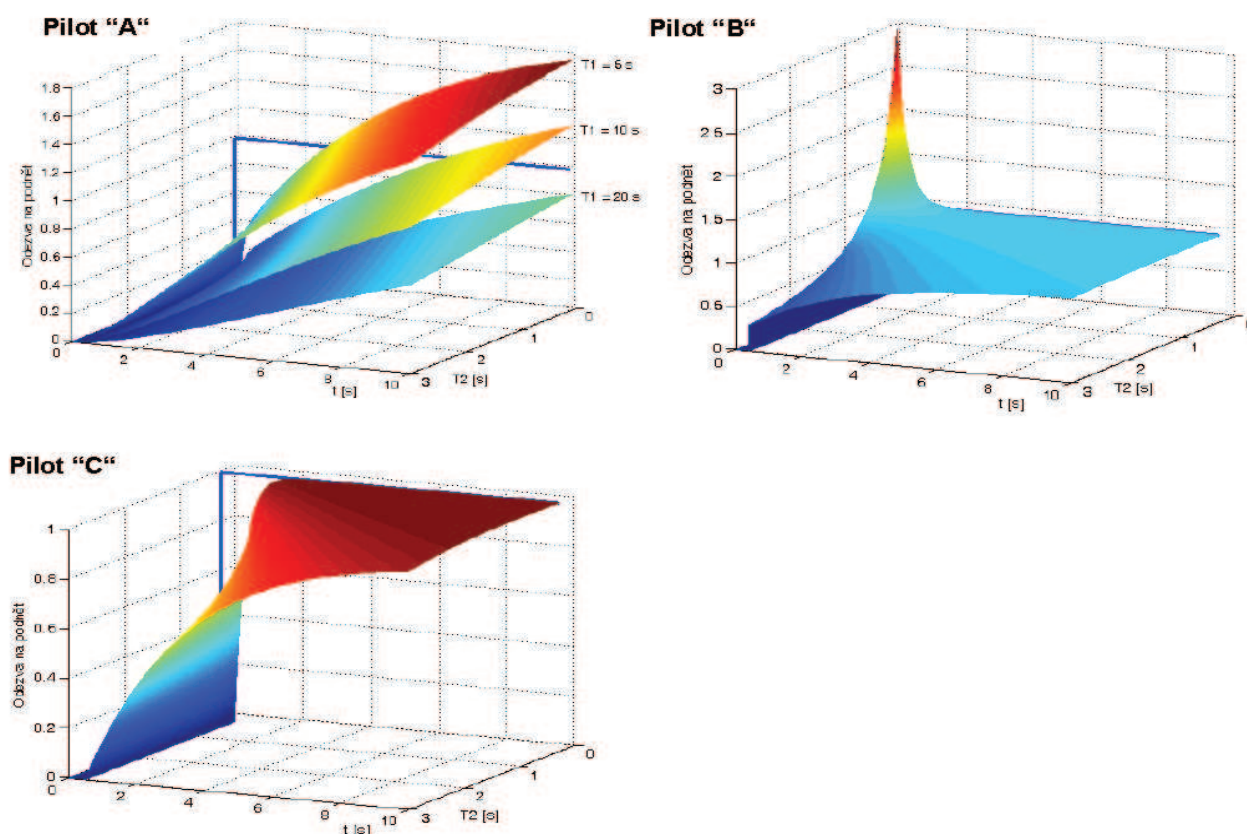
Jako vstupní signál jsem zvolil jednotkový skok. Jednotlivé odezvy pro různé dynamické vlastnosti pilotů jsem zobrazil v grafu na Obr. 16.



**Obr. 16** Odezva modelů pilotů na jednotkový skok

V grafu na Obr. 16 je zobrazena odezva na jednotkový skok v čase 0. Pilot A má velice pomalý regulační děj a navíc nemá nulovou regulační odchylku v ustáleném stavu. Pilot B má, jak vidíme, velice vysoký překmit. Z hlediska regulace je na tom nejlépe pilot C, jehož přenosová funkce byla zjednodušena nejvíce.

V práci pana Jaloveckého ([6], str. 50) jsou zobrazeny podobné odezvy stejných modelů pilotů, ale s proměnným parametrem  $T_2$ . Pro pilota A dokonce i tři různé změny prediktivní časové konstanty  $T_1$ . Ze simulací je patrné, že pilot typu A má spíše aperiodický průběh. Pilot B má při malých hodnotách neuromuskulární časové konstanty  $T_2$  má také aperiodický průběh a při vyšších hodnotách má charakter rychlého derivačního članku. Opět se ukazuje, že nejlepší průběh má pilot C. Při nízkých hodnotách neuromuskulární časové konstanty  $T_2$  má charakter rychlého aperiodického děje a při větších se pak projeví přiměřenou reakcí na podnět.



Obr. 17 Odezvy modelů člověka na jednotkový puls – proměnný parametr  $T_2$  [6]

### 3.2.5 Rozdíl jízdy v tunelu a na volné komunikaci

V tunelech se oproti ostatním pozemním komunikacím stane mnohem méně dopravních nehod. Je možné, že je to dáno větší opatrností a koncentrací řidičů na řízení, protože nehoda v tunelu představuje velmi závažné nebezpečí.

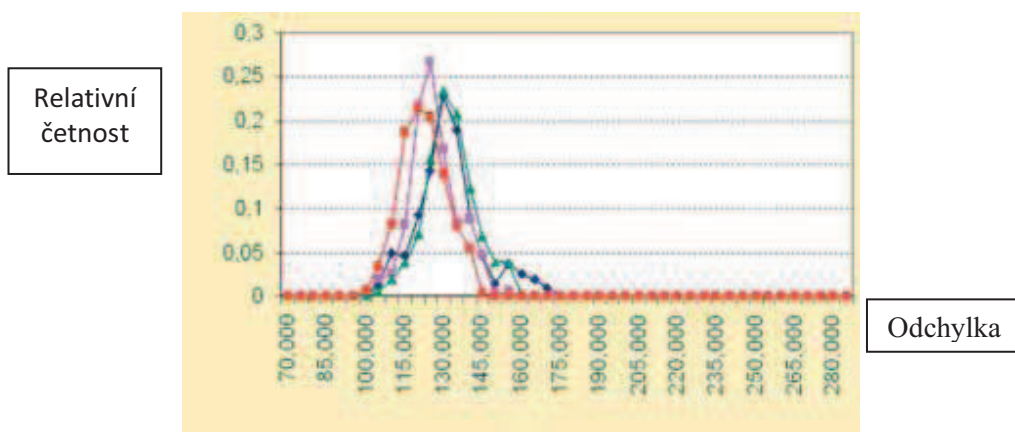
V rámci projektu OPTUN (optimalizace provozu silničních tunelů) byl prováděn výzkum zkoumající rozdíly v chování řidičů jedoucích tunelem a po volné komunikaci [16]. Pro vyhodnocení zaznamenávali vzdálenost vozidla od středové dělicí čáry.

Analýzou chování řidiče z hlediska příčné složky řízení dospěli k tomu, že řidič zaostruje svůj pohled na bod, ke kterému dojde asi za 4 s. Podle rychlosti to řádově odpovídá desítkám metrů. Pokud silnice zatáčí, sleduje řidič vnitřní okraj zatáčky. Kola vozu natáčí tak, aby sledovala směr jeho pohledu, tedy směr tečny k vnitřnímu okraji zatáčky. Mimoto vnímá periferním viděním blízké okolí i středovou čáru. Trajektorie, po které se vozidlo pohybuje je ovlivněna prediktivní složkou řízení (natáčení vozidla ve směru tečny k vnitřnímu bodu zatáčky) a kompenzačním řízením (udržování konstantní vzdálenosti od středu vozovky).

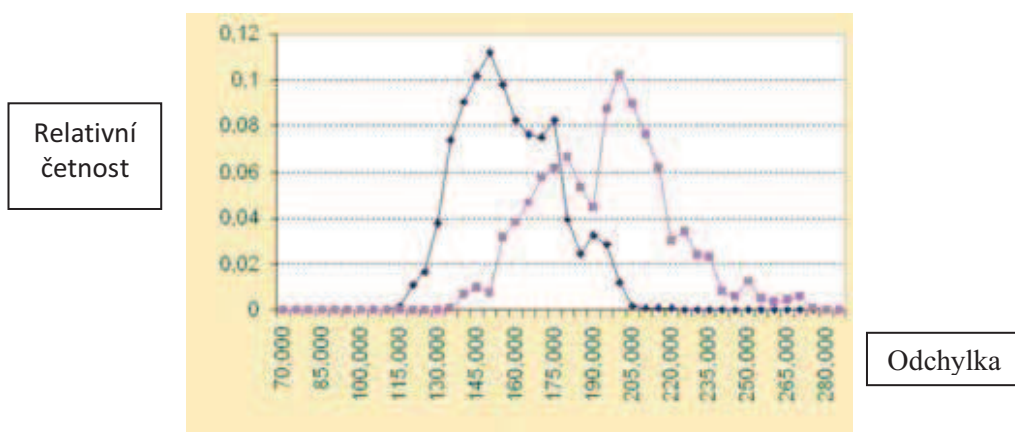


Obě složky se od sebe liší frekvenčním pásem. Psychofyziologický stav řidiče lépe ukazuje kompenzační složka, protože je o řád rychlejší než prediktivní. Směr řidič udržuje pomalými pohyby volantu, kdežto pozici v jízdním pruhu rychlejšími korekčními pohyby.

Při jízdě byla zaznamenána relativní četnost odchylek od středového pásu během jízd v tunelu a na volné komunikaci (Obr. 18, Obr. 19 převzato z [16], str. 51). Řidiči projíždějící tunelem se drží dál od stěn, střední vzdálenost je mnohem blíže k dělicí čáře. Z histogramu je také patrné, že řidiči v tunelu si hlídají tuto vzdálenost mnohem úzkostlivěji, nemají takový rozptyl. Prováděný experiment byl prováděn při zhruba konstantní rychlosti 70 km/h, byla brána v úvahu jízda pouze v jednom pruhu, ale vliv okolní dopravy vyloučit nešlo. Slabinou tohoto výzkumu je však malý počet testovacích jízd.



Obr. 18 Histogram jízd v tunelu Strahov [16]



Obr. 19 Histogram jízd na silnici [16]

Experiment byl opakován v simulátoru kokpitu automobilu Škoda, scéna byla doplněna o 3D efekt. I zde se projeví podobné hodnoty rozptylů odchylek trajektorií.

## 4 REALIZACE MĚŘENÍ PARAMETRŮ LIDSKÉHO OPERÁTORA

Cílem této části je změřit konkrétní hodnoty přenosové funkce člověka. Pro přenosovou funkci vycházející z Mc Ruerova modelu jsou volnými parametry zesílení  $K$ , konstanty  $T_a$ ,  $T_n$ ,  $T_l$  a dopravní zpoždění  $T_d$ .

$$F(p) = K \frac{(T_a p + 1)}{(T_n p + 1)(T_l p + 1)} e^{-T_d p} \quad (4-1)$$

### 4.1 Matlab

Programové prostředí a jazyk MATLAB jsou zaměřeny na vědeckotechnické výpočty, vizualizaci a programování. Je to interaktivní systém, jehož základní datovou jednotkou je bezrozměrné pole. Tím je umožněno řešení mnoha výpočetních problémů v daleko kratším čase, než by tomu bylo při použití jazyků, jako jsou C a Fortran. Název MATLAB vznikl jako zkratka z MATrix LABoratory. Vytvořil jej firma MathWorks.

#### 4.1.1 Simulink

Simulink je nástroj pro modelování, simulaci a analýzu dynamických systémů. Tvorba modelů se provádí graficky, pospojováním předem naprogramovaných bloků. Ty jsou přehledně uspořádány v knihovnách. Je také možnost, vytvořit si bloky vlastní.

M-file

Je to textový dokument obsahující posloupnost příkazů, které by se jinak musely zadávat jednotlivě do příkazové řádky. Mohou být psány buď ve formě skriptu (nemá žádná vstupní ani výstupní data) nebo ve formě funkce. M-file soubory jsou pojmenovány podle své koncovky „m“.

V mém spouštěcím skriptu, je v prvních řádcích možnost nakonfigurovat měření. První příkazy zavřou všechna otevřená okna a vyčistí obrazovku (Command window) Matlabu. V konfiguraci máme možnost zvolit si délku simulace. Její přednastavená hodnota je 10. Dále máme na výběr různé vstupní signály. Je možno vybrat více signálu zároveň. Podrobnější popis výběru signálu je v kapitole 4.3.2 Vstupní signál.

Ukázka skriptu umožňujícího měnit délku měření a vstupní signál:

```
%% Konfigurace
delka_mereni=10;
%volba_vstupu 0..zakazano, 1..povoleno
    step1_x=0;
    step2_x=0;
    sine1_x=1;
    sine2_x=1;
```

## 4.2 Měřicí metoda

Návrh parametrů probíhá na základě metody Nelder-Mead. Principem této metody je volení takových parametrů, aby se minimalizoval rozdíl mezi výstupem systému a výstupem modelu. Iterační výpočet probíhá přímým prohledáváním stavového prostoru.

Problémem této metody je volba počátečního nastavení parametrů. Není jisté, zda se nám podaří nalézt globální minimum, algoritmus může zabloudit. Naopak výhodou je snadná implementace a rychlost výpočtu. Také nejsou kladeny nároky na tvar hodnotícího kritéria. Tato metoda je implementována v systému MATLAB jako funkce *fminsearch*. Příkaz pro její volání je ve tvaru:

```
x = fminsearch(fun,x0,options,data)
```

Návratovou hodnotou funkce *fminsearch* je vektor hodnot *x*, pro které hledáme minimum. Parametrem pro volání je funkce *fun*, kterou chceme minimalizovat, vektor *x0* obsahující počáteční odhad parametrů a položky nastavení *options*. Položka *options* není povinná, ale slouží k nastavení průběhu iteračního výpočtu.

```
options = optimset('param1',value1,'param2',value2,...)
```

Řetězec *optimset* obsahuje následující parametry *param* a hodnoty *value*:

- DisplayLevel – nastavení úrovně zobrazení hlášení (off – vypnuté, iter – po každé iteraci, final – pouze konečná iterace, notify (defaultně) – pouze pokud výpočet nekonverguje),
- FunValCheck – kontrola, zda jsou hodnoty vrácené funkcí platné (on/off),
- MaxFunEvals – maximální počet vyhodnocení minimalizované funkce,
- MaxIter – Maximální počet iterací,
- OutputFcn – uživatelská funkce volaná během každé iterace,
- TolFun – Ukončovací podmínka funkční hodnoty. Pokud je změna funkční hodnoty menší než zvolená hodnota, výpočet se ukončí,

- TolX – Ukončovací podmínka proměnný x. Pokud bude hodnota změny proměnných x menší než zvolená hodnota, výpočet se ukončí.

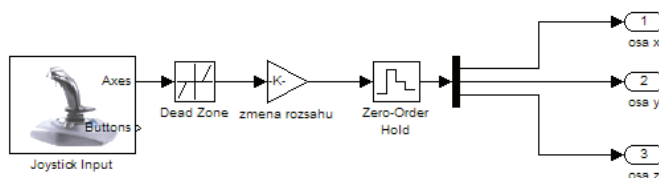
Posledním parametrem funkce *fminsearch* jsou *data*. Tento parametr umožňuje předat hodnotící funkci další údaje. V mém případě budu do funkce vkládat hodnoty, které vznikly zpracováním hodnot řízení systému člověkem.

### 4.3 Model řízený člověkem

Před tím, než se budu zabývat návrhem přenosové funkce pro lidského řidiče, je třeba získat a zpracovat data o chování skutečného řidiče. Jako vhodný způsob jsem zvolil ukládání hodnot výstupu pákového ovladače Joystick (Obr. 20) pomocí bloků v programu Simulink.



Obr. 20 Pákový ovladač typu Joystick [26]



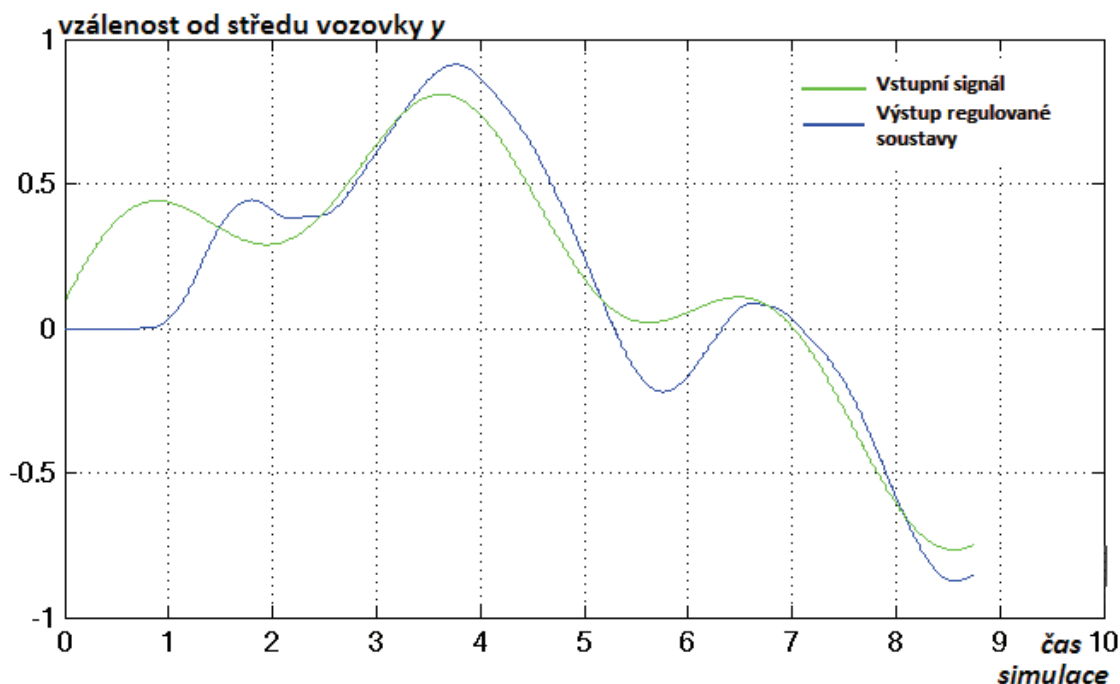
Obr. 21 Blokové schéma zpracování výstupu ovladače Joystick

Bloček *Joystick Input* je standardně definovaný v knihovně *Virtual Reality Toolbox*. Výstupní signál je upraven na rozsah  $(-1;1)$  a je přidána necitlivost *Dead Zone* o velikosti 0,3. Signál je vzorkován s periodou 0,01. Schéma je znázorněno na Obr. 21.

Celá simulace je zpožděna, aby její rychlost nezávisela na rychlosti procesoru počítače. Po každém vzorku je simulace zastavena na 0,01 s. Celková doba kroku tedy činní součet pauzy (0,01 s) a velice krátké doby výpočetního času. Jeho velikost je sice malá, ale v průběhu měření se mění. Naštěstí je odchylka dostatečně malá, aby neměla na výsledek měření vliv (viz Kapitola 424.3.4). Zpožďovací příkaz *pause (0.01)* je volán z bločku *Embedded MATLAB Function1*.

### 4.3.1 Měření odezvy

Úkolem lidského operátora je řídit soustavu tak, aby minimalizoval rozdíl mezi vstupní veličinou a výstupem regulované soustavy. Tento rozdíl operátor porovnává během simulace v grafu závislosti vstupního signálu a výstupu soustavy na čase Obr. 22. V případě, že je řízenou soustavou vozidlo, není tato forma prezentace rozdílu vstupního signálu a výstupu soustavy příliš vhodná. Výstup regulované soustavy nám udává pouze vzdálenost od středu vozovky. V praxi však řidič vnímá nejen vzdálenost od středu vozovky (případně jiného bodu, který má za úkol následovat – střed jízdního pruhu atd.) ale také natočení celého vozidla vzhledem k vozovce. Při této simulaci je nutné vzít v úvahu, že operátorovi chybí podstatná část informace – údaj o směru jízdy. Tato chybějící informace má za následek výrazné zhoršení dynamických vlastností regulace pro soustavu typu auto. Nejlepším řešením by bylo, nechat ho řídit skutečný simulátor vozidla, kde je řidiči promítán obraz, tak aby bylo zřejmé, kde se na vozovce nachází a kterým směrem jede.



Obr. 22 Ukázka grafu k porovnání signálů operátorem

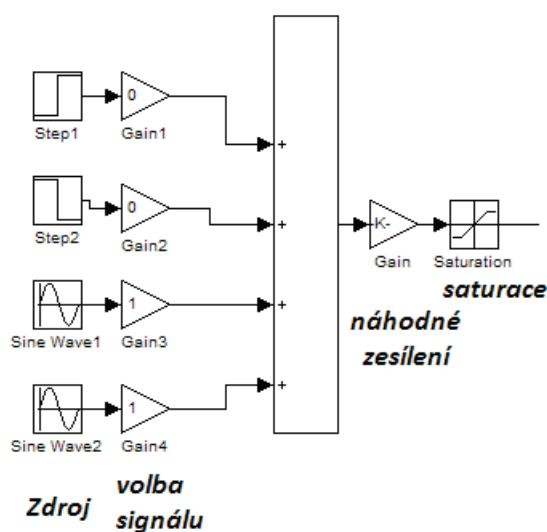
Graf na Obr. 22 zobrazuje postupně se vykreslující vstupní signál a výstup člověkem regulované soustavy. Tento signál nese informaci o vzdálenosti od středu vozovky.

### 4.3.2 Vstupní signál

V inicializačním skriptu (M-file) je možnost si vybrat několik vstupních signálů, pro které bude muset lidský operátor vyregulovat výstupní veličinu. Výběr signálu je proveden nastavením příslušného zesílení *Gain* na hodnotu 0 nebo 1.

```
set_param('mereni/Gain1', 'Gain', mat2str(0));
```

Vstupní signál Obr. 23 může být tvořen skokem (Step1 0 => 0.5 v čase 2) nebo (Step2 0 => -0.5 v čase 5) nebo jejich součtem. Také je možnost místo skoku vybrat sinusový zdroj signálu (Sine Wave, amplituda 0.8, frekvence 0.5 rad/s) a (Sine Wave, amplituda 0.3, frekvence 2 rad/s, fázový posuv je náhodný). Pokud budu chtít měřit předem neznámý signál, použiji součet dvou sinusovek s náhodně voleným fázovým posuvem. Současně je náhodně voleno zesílení vstupního signálu z rozmezí hodnot (0,6 – 1). Výstupní signál je oříznut saturací na hodnotu (-1;1)



Obr. 23 Volba vstupního signálu

### 4.3.3 Řízená soustava

Nejjednodušší soustava má přenos 1. Co je na vstupu, je i na výstupu. To znamená, že výstupem v mé simulaci, kde použiji tuto soustavu, bude hodnota z ovladače Joystick. Pro svoji jednoduchost se hodí k otestování, zda nastavení parametrů probíhá dle očekávání.

Tab. 2 Přenosové funkce soustav typických pro letectví a automobilismus [4]

Přenosová funkce $Y(p)$ regulované soustavy	Aplikace v letectví	Aplikace v automobilismu
$K$	Regulace polohy ve vzduchu nebo při rolování	Regulace rychlosti vozidla
$\frac{K}{p}$	Regulace výkyvů ve vzduchu nebo při rolování	Regulace směru vozidla při málo měnící se rychlosti
$\frac{K}{p(Tp + 1)}$	Regulace polohy při rolování konvenčních letadel s časovou konstantou poklesu rolování $T$	
$\frac{K}{p^2}$	Regulace směru kosmických lodí Limitní případ pro regulaci polohy pro rolování konvenčních letadel s velkou časovou konstantou	Regulace podélné polohy vozidla  Regulace příčné polohy s malým výhledem vpřed

$\frac{K}{(p+a)(p-\lambda)}$	Výšková regulace nestabilních rychlých kmitů	Regulace směru nestabilních přetáčivých vozidel při vysokých rychlostech
------------------------------	--	--

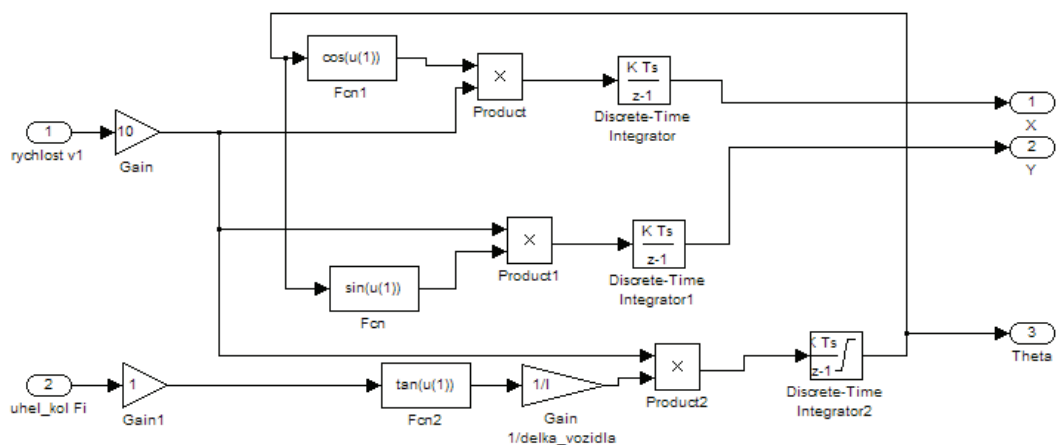
V praxi může být regulovaná soustava jakákoli, přehled přenosových funkcí soustav typických pro letectví a automobilismus je v tabulce Tab. 2. V této práci se zaměřím na řízení automobilu, konkrétně na *regulaci příčné polohy s malým výhledem vpřed*.

Úkolem lidského operátora bude měnit úhel natočení kol u podvozku Ackermannova typu s pohonem zadních kol. Pro účely simulace jsem využil hotového schéma bločků Ing. Petra Havláta, který je použil pro diplomovou práci Simulátor mobilních robotů v prostředí Matlab/Simulink [25]. Schéma Obr. 24 vychází z kinematiky čtyřkolového podvozku s pohonem zadní nápravy, takového jaký má automobil (car-like model).

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ (\tan \varphi)/l \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_2 \quad (4-2)$$

V rovnici (4-2) popisující kinematiku podvozku s pohonem zadní nápravy jsou veličiny  $x, y$  kartézské souřadnice vzhledem k vztažnému bodu ležícímu uprostřed zadní nápravy. Úhel otočení vozidla vůči přímému směru vozovky je označen  $\theta$  a úhel natočení předních kol oproti středové ose vozidla  $\varphi$ . Rychlosti  $v_1, v_2$  jsou řídicí proměnné. Proměnná  $v_1$  určuje rychlost vozidla a proměnná  $v_2$  rychlost natáčení kol vozidla. Operátor však neřídí rychlost, ale přímo úhel natočení kol. Proto jsem odebral ze schématu integrátor integrující veličinu  $v_2$ . Protože mnou zkoumaná je úloha příčného řízení, nedostane operátor možnost měnit rychlost vozidla  $v_1$ . Tato rychlost bude konstantní. Vzdálenost mezi nápravami automobilu je určena konstantou  $l$ .

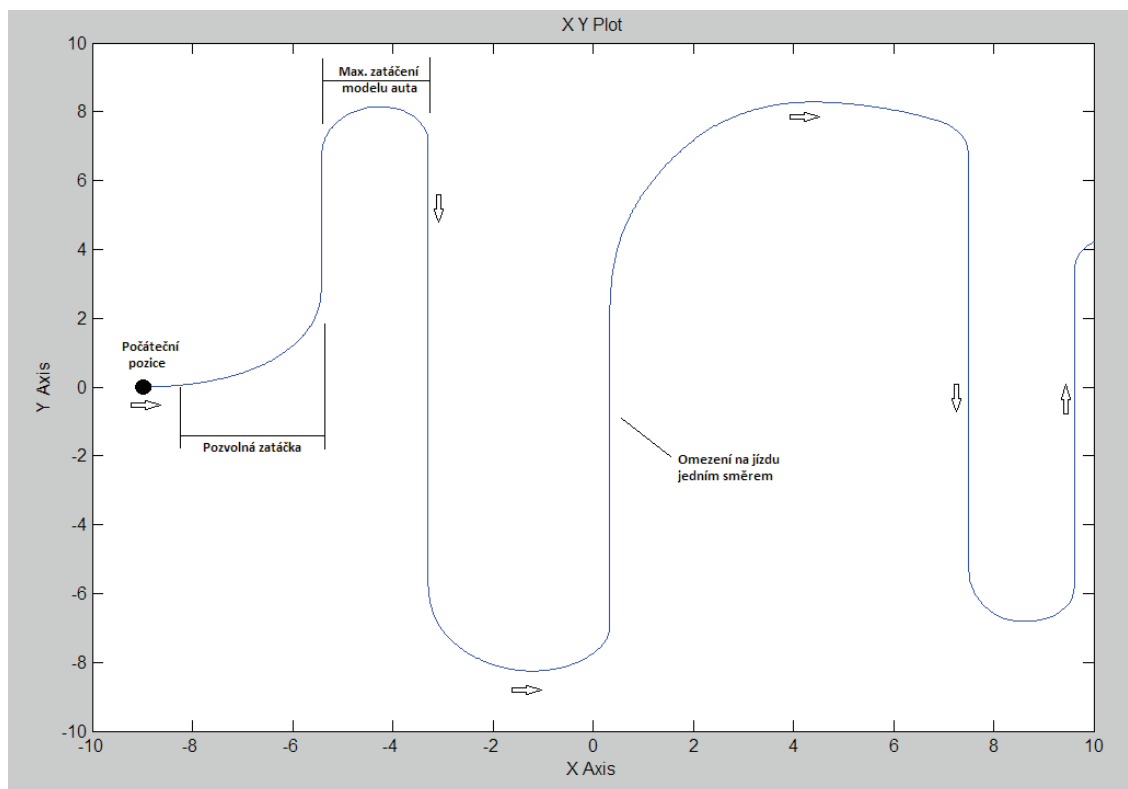




Obr. 24 Schéma soustavy vozidlo s pohonem zadních kol

Kvůli problémům s řiditelností tohoto modelu jsem musel omezit vozidlo na jízdu pouze jedním směrem. Rozsah otočení vozidla  $\theta$  je omezen na  $(-\pi/2; \pi/2)$ . Tento problém vzniká, protože řidiči předávám pouze informaci o vzdálenosti  $y$  od středu vozovky, nikoliv úhel natočení vozidla  $\theta$ .

V grafu Obr. 25 zobrazení  $y=f(x)$  je vidět, jak se vozidlo pohybuje v prostoru. Z počáteční pozice  $[-9;0]$  se vozidlo vydává po modré trajektorii ve směru šipek. Nejprve jsem udělal pozvolnou otáčku doleva, přičemž jsem postupně zvyšoval úhel natočení kol. Poté jsem prudce zatočil doprava o úhel  $180^\circ$ . Velikost poloměru zatáčky je dána maximálním úhlem vytočení kol  $\varphi$  a vzdáleností  $l$  mezi nápravami. Dále je na Obr. 25 vidět, že se vozidlo může pohybovat pouze zprava doleva v důsledku omezení úhlu natočení vozidla  $\theta$ .



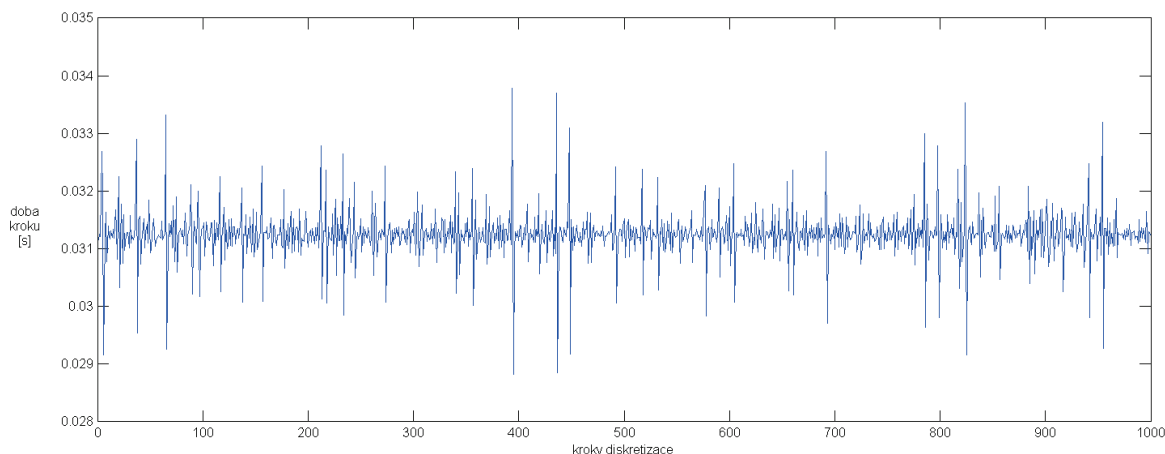
Obr. 25 Graf zobrazující trajektorii automobilu

Nyní tedy máme říditelný model vozidla a testovací přenosovou funkci. Člověk, který tyto soustavy řídí, ovládá Joystick tak, aby vykompenzoval rozdíl mezi vstupní hodnotou udávající požadovanou vzdálenost od středu vozovky a aktuální vzdáleností modelu od středu vozovky.

#### 4.3.4 Nehomogenita času měření

Protože vzorkování neprobíhá v reálném čase, ale v závislosti na rychlosti výpočtu, dochází k tomu, že se velikost kroků v čase mění. Tento jev má zkreslující efekt na výsledek měření.

Bylo nutné, abych se přesvědčil, že nesouměrnost velikosti kroků nebude natolik velká, aby zásadním způsobem ovlivnila měření. Nastavil jsem dobu pauzy v simulaci na 0,02 s. Voláním příkazů Matlabu *tic* a *toc* jsem změřil skutečnou velikost doby trvání kroku simulace. Průměrná velikost doby kroku simulace byla 0,0313 s. Maximální odchylka od této doby činila 0,0025 s, čili 7,99 %. Takto velká odchylka se však objeví výjimečně. Variance doby kroku simulace je 19,48  $\mu$ s. Jednotlivé doby trvání kroků simulace jsou zobrazeny v grafu Obr. 26. Odchylka velikosti kroků zásadním způsobem výsledky měření neovlivní.



**Obr. 26** Graf zobrazující velikosti doby kroků simulace

Pro měření časových údajů, jako je například doba zpoždění  $T_d$  reakce člověka, musím vzít v úvahu, že simulace neprobíhá v reálném čase. Je třeba vzít v úvahu výpočetní zpoždění. V případě, že je doba kroku simulace vždy stejná, mohu vypočítat koeficient udávající poměr mezi skutečným a simulačním časem.

$$k = \frac{\text{skutečná doba měření}}{\text{doba měření v simulaci}} \quad (4-3)$$

Dejme tomu, nastavil jsem dobu simulace na 10 sekund. Ve skutečnosti trvala simulace sekund 15. Koeficient spočítáme dle rovnice uvedené výše, tedy  $k = 1,5$ . Pokud vyjde dopravní zpoždění  $T_d = 0,2$  sekundy simulačního času, je třeba tento výsledek vynásobit koeficientem  $k$ . To znamená, že skutečné dopravní zpoždění je  $T_d = 0,3$  sekundy.

## 4.4 Model řízený počítačem

Základem je klasická regulační smyčka Obr. 2, kde do regulátoru vstupuje rozdíl mezi požadovanou vzdáleností od středu vozovky a současnou vzdáleností  $y$ . Požadovanou vzdáleností je stejný vstupní signál, jako byl předložen lidskému operátorovi. Řízenou soustavou je stejně jako v případě lidské operátora model automobilu s pohonem zadní nápravy Obr. 24 nebo testovací model s přenosem jedna. Nelinearity působící ve zpětné vazbě lidského operátora zanedbám.

Regulátorem bude model pilota vycházející z Mc Ruerova modelu (4-1). Výsledná vzdálenost modelu automobilu od středu vozovky  $y$  bude uložena v pracovním prostředí Matlab a porovnána s výstupem téhož modelu řízeného

člověkem. Iterační funkce *fminsearch* mění parametry modelu lidského operátora (pilot A, pilot B, pilot C) tak, aby se výsledný průběh regulace co nejvíce přiblížil průběhu regulace řízené člověkem.

Otevřenou otázkou zůstává volba počátečního nastavení parametrů ( $K$ ,  $T_n$ ,  $T_a$ ,  $T_L$ ,  $T_d$ ). V simulaci jsem zvolil počáteční odhad, kde všechny parametry byly rovny 1. Z práce paní Ing. Marie Havlíkové, Ph.D. [3] vyplývá, že zesílení  $K$  je voleno na základě regulované soustavy a zbylé parametry jsou ve všech modelech podobné.

- Neuromuskulární časová konstanta  $T_n = (0 - 0,1)$  s,
- Prediktivní časová konstanta  $T_a = (0 - 2)$  s,
- Setrvačná časová konstanta  $T_L = (0,1 - 0,4)$  s,
- Reaktivní doba řidiče  $T_d = (0,12 - 0,3)$  s.

Z důvodu, že simulace trvá značný čas, jsem nastavil maximální hodnotu počtu iterací na 100. Uspokojivý výsledek se daří nalézt před tímto limitem. Většina případů, kdy má být limit počtu operací překročen, nevede k nalezení dobrého výsledku – hodnota chybové funkce je příliš velká a algoritmus není schopen nalézt správné parametry.

Hledané parametry nemohou být záporná čísla. Pokud tedy funkce *fminsearch* navrhne použití čísla menšího než nula pro hodnotu jakéhokoli parametru, bude výsledek předem považován za špatný. Přesto se občas simulace zasekla v neřešitelném stavu – výstupní signál má tendenci růst do nekonečna. Problémy vymizely, když jsem hranici platných parametrů zvedl na hodnotu 0,1.

Pro určení kvality nalezených parametrů je kriteriem hodnocení nalezených parametrů integrální kvadratické kritérium.

$$kriterium = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad \text{integrální kvadratické kritérium (4-4)}$$

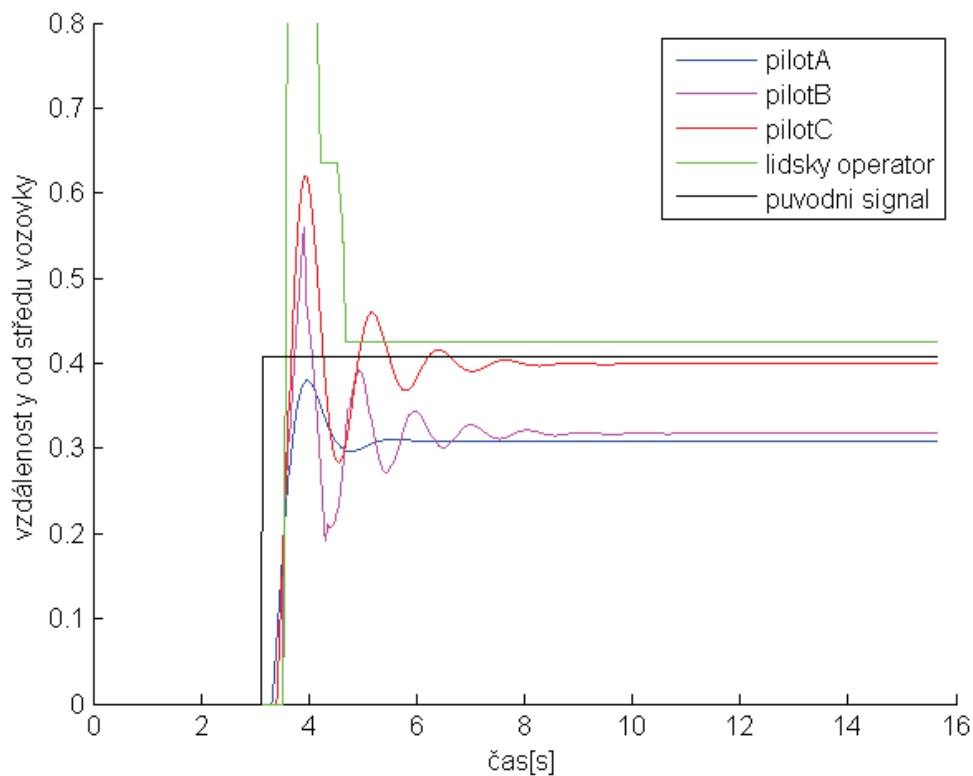
Hodnota kritéria bude záviset na tom, jak daný model lidského operátora vystihuje chování skutečného řidiče. Tato odchylka se nazývá předpojatost modelu (Bias). Dále hodnotu kritéria ovlivňuje odchylka způsobená omezeným množstvím dat (Variance). Při větším počtu dat je možno lépe navrhnout parametry modelů lidského operátora. Změnit množství dat získaných během měření je možné úpravou doby měření. Standardně je délka měření nastavena na 10, což je většinou kolem 15-ti sekund skutečného času (viz. 4.3.4).

Velkým zdrojem odchylky nalezených modelů od skutečného řidiče je i to, že jeho řízení není bezchybné. Důsledkem je pak nepřiměřeně vysoký překmit výstupního signálu oproti požadovanému signálu nebo příliš pomalá reakce. Schopnosti řidiče se v průběhu času lepší vlivem učení.

## 4.5 Navržené hodnoty parametrů

Úlohy lidského operátora se zhostím já osobně, protože mám naučené ovládání Joysticku. Při testu na jiných osobách se ukázalo, že ačkoli jsou to třeba i zkušenými řidiči z povolání, ovládání Joysticku je jim cizí a nedovedou bez tréninku správně řídit soustavu.

Pro měření je nutné si zvolit typ regulované soustavy a také vstupní signál. Pro ověření správné funkce je vhodné si nejprve zvolit triviální soustavu s přenosovou funkcí 1 ( $Y(p) = 1$ ). Vstupním signálem bude jednotkový skok.



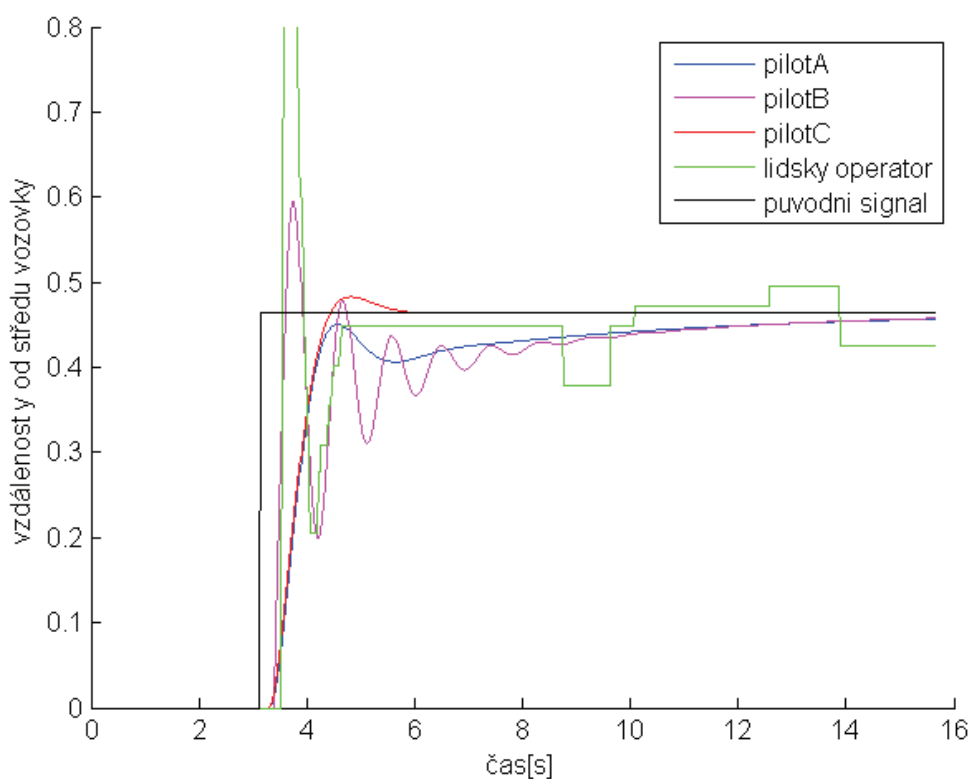
Obr. 27 Výstup modelu - přenosová funkce 1

Tab. 3 Hodnoty parametrů - přenosová funkce 1

	K	$T_n$	$T_I$	$T_a$	$T_d$
<b>Pilot A</b>	4,93	0,61	0,50	0,15	0,17
<b>Pilot B</b>	5,53	-	1,09	0,15	0,41
<b>Pilot C</b>	87,48	-	14,26	-	0,27

Z grafu Obr. 27 je vidět, že Modely Pilot A a Pilot B nedovedou dobře aproximovat lidského operátora. Ustálená odchylka modelů není nulová, bylo by výhodné přiřadit do modelů integrátor.

Použitím integrátoru před modelem má na průběh regulace pozitivní vliv. Úlohu integrátoru splní použití složitější soustavy, takže není potřeba měnit tvar modelů řidiče.

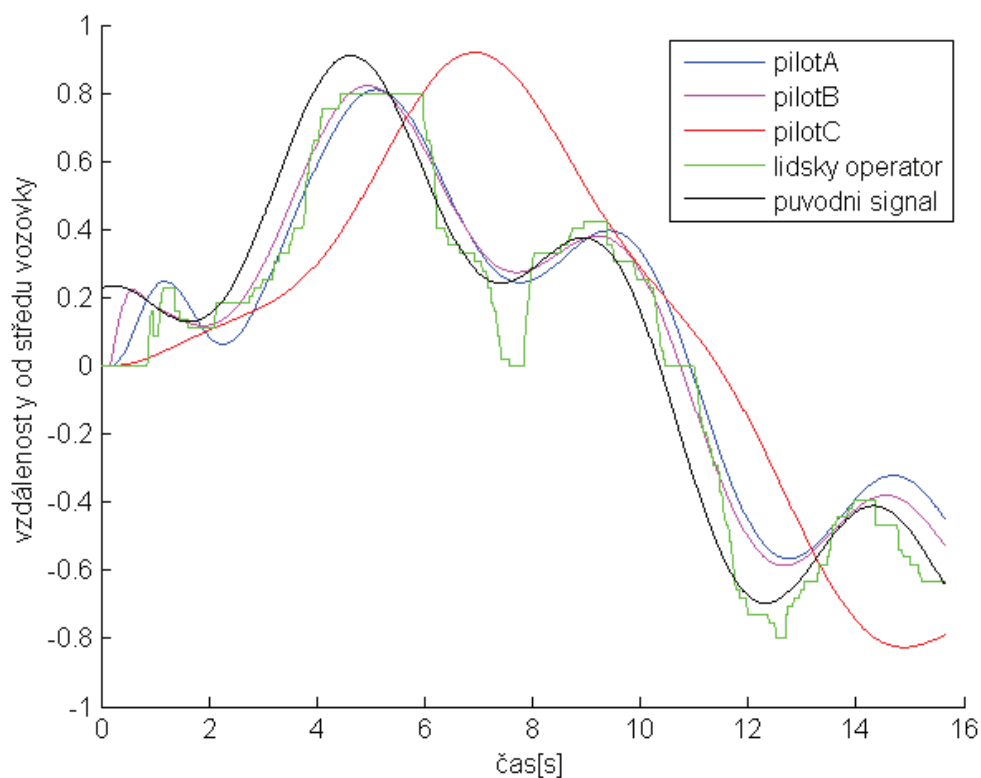


Obr. 28 Výstup modelu - přenosová funkce 1 s integrátorem

Tab. 4 Hodnoty parametrů - přenosová funkce 1 s integrátorem

	<b>K</b>	<b>T<sub>n</sub></b>	<b>T<sub>I</sub></b>	<b>T<sub>a</sub></b>	<b>T<sub>d</sub></b>
<b>Pilot A</b>	1,83	1,76	0,21	4,34	0,17
<b>Pilot B</b>	1,80	-	0,41	3,08	0,25
<b>Pilot C</b>	3,81	-	0,16	-	0,16

Další měření budou hodnoty parametrů pro přenosovou funkci 1 s přidaným integrátorem, ale vstupní veličinou bude součet dvou sinusovek vzájemně fázově posunutých a s jinou frekvencí. Tento vstupní signál je vytvořen náhodně, každé měření jinak.



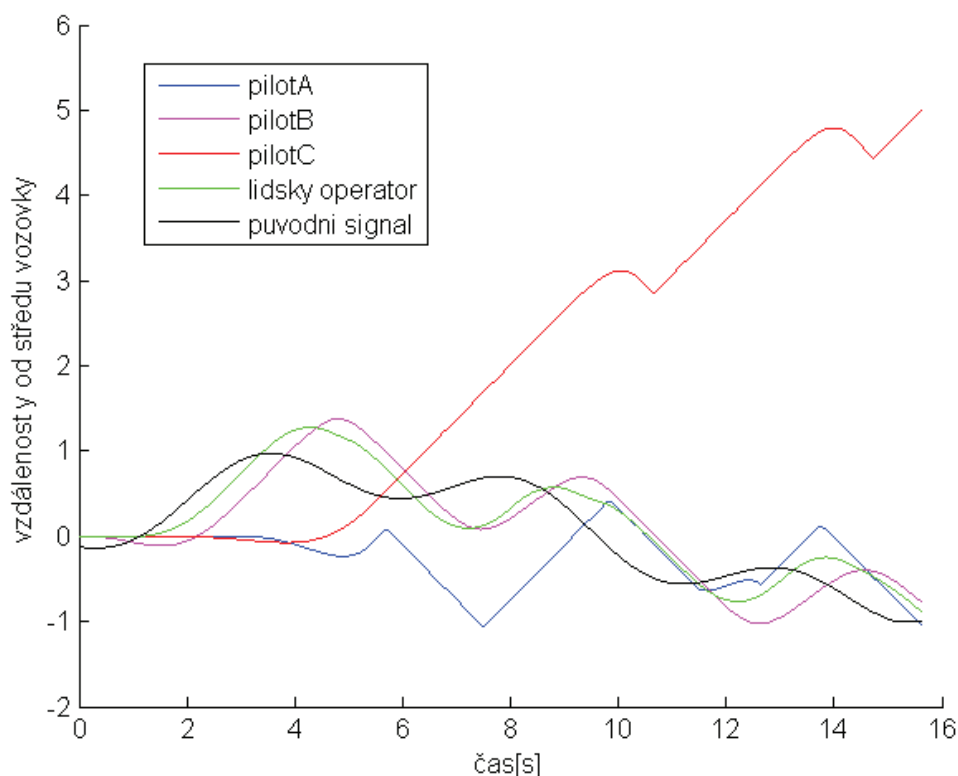
Obr. 29 Výstup modelu - přenosová funkce 1 s integrátorem, vstupní signál náhodný

Tab. 5 Hodnoty parametrů - přenosová funkce 1 s integrátorem, vstupní signál náhodný

	K	$T_n$	$T_I$	$T_a$	$T_d$
<b>Pilot A</b>	1,67	0,49	0,61	3,93	0,16
<b>Pilot B</b>	2,91	-	0,94	2,89	0,16
<b>Pilot C</b>	2,22	-	2,06	-	0,16

Z obrázku Obr. 29 je vidět, že pokud použijeme integrátor, Pilot A a Pilot B dobře napodobí regulaci lidského operátora. Na konci simulace je vidět, že se lidský operátor naučil předvídat tvar vstupního signálu. Také si můžeme všimnout chyby lidského operátora při řízení v čase 7,6 sekund. Pilot C vůbec nedokáže výstupní signál aproximovat.

Další simulovanou soustavou bude model *automobilu s pohonem zadních kol* Obr. 24. Řízení této soustavy pouze na základě hodnoty vzdálenosti od středu vozovky je obtížné, proto lze očekávat větší odchylky výstupů z této soustavy.



Obr. 30 Výstup modelu - automobil , vstupní signál náhodný

Tab. 6 Hodnoty parametrů pro soustavu automobil, vstupní signál náhodný

	K	$T_n$	$T_I$	$T_a$	$T_d$
<b>Pilot A</b>	1,89	0,50	0,86	2,78	2,88
<b>Pilot B</b>	1,11	-	0,39	1,63	0,17
<b>Pilot C</b>	1,80	-	1,40	-	1,42

V grafu na Obr. 30 je vidět, že se nepodařilo najít vhodnou aproximaci pro modely lidského operátora Pilot A a Pilot C. Jediným použitelným modelem je Pilot B. Jeho schopnost řídit soustavu obsahující dva integrátory, vyplývá z jeho povahy rychlého derivačního členu. Přidání integrátoru do modelu lidského operátora, jak jsem navrhoval pro soustavu s přenosovou funkcí jedna, by v tomto případě bylo kontraproduktivní.

Při opakování simulace s náhodným vstupním signálem se opakovala situace z Obr. 30. Jediné model, který dokázal aproximovat řízení lidského operátora, je model Pilot B. Měření několikrát zopakují a uvedu nejvhodnější hodnoty parametrů modelu řidiče Pilot B. Ostatní modely pilotů nejsou pro řízení modelu automobilu s pohonem zadních kol vhodné.



**Tab. 7 Hodnoty parametrů modelu Pilot B při regulaci automobilu, vstupní signál náhodný**

<b>Pilot B</b>	<b>K</b>	<b>T<sub>n</sub></b>	<b>T<sub>I</sub></b>	<b>T<sub>a</sub></b>	<b>T<sub>d</sub></b>
<b>Měření 1</b>	1,11	-	0,39	1,63	0,17
<b>Měření 2</b>	0,78	-	0,19	4,52	0,16
<b>Měření 3</b>	0,52	-	0,18	5,35	0,16
<b>Měření 4</b>	1,35	-	0,24	2,29	0,17
<b>Měření 5</b>	0,77	-	0,23	4,06	0,19
<b>Měření 6</b>	0,83	-	0,22	3,97	0,27

Měření jsem provedl vícekrát, ale v tabulce Tab. 7 jsem uvedl pouze ta měření, pro které získaný model Pilot B našel dobrá řešení. U měření, která nejsou součástí tabulky a jejich průběh výstupu soustavy (vzdálenost vozidla od středu vozovky) se značně liší od lidského operátora, jsem si všimnul, že hodnota jejich parametru  $T_i$  je vždy větší než jedna.

Hodnoty jednotlivých časových konstant  $T_b$ ,  $T_d$  odpovídají předpokládaným hodnotám [3]. Prediktivní časová konstanta  $T_a$  tento rozsah překračuje. Pro model řidiče má velký význam, protože funguje jako derivační člen a umožňuje regulovat tento typ soustavy. Její velikost přesahující předpokládaný rozsah může být způsobena tím, že řidič dokázal odhadnout budoucí tvar vstupního signálu.

- Neuromuskulární časová konstanta  $T_n = (0 - 0,1)$  s,
- Prediktivní časová konstanta  $T_a = (0 - 2)$  s,
- Setrvačná časová konstanta  $T_I = (0,1 - 0,4)$  s,
- Reaktivní doba řidiče  $T_d = (0,12 - 0,3)$  s.

## 5 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

V práci jsem popsal, jak funguje řízení podélného směru vozidla, pokud řidič následuje vozidlo jedoucí před ním. Vyhledal jsem několik modelů popisujících jeho chování a uvedl, které modely nejvíce odpovídali skutečným naměřeným hodnotám. Pro podélné řízení byl nejlepší Gippsův model.

Pro modely příčného řízení jsem uvedl přenosové funkce vycházející z PID regulátoru, modely obsahující predikční složku a modely pilota při řízení letounu. Modely pilotů jsem implementoval do prostředí Matlab/Simulink, kde jsem si zobrazil jejich odezvy na jednotkový skok. Z hlediska kvality regulačního děje se mi jevil jako nejlepší pilot C.

Další část této bakalářské práce se týkala měření dynamických vlastností lidského operátora. Vytvořil jsem skript, který pro tři typy modelů lidského operátora realizuje měření výstupu regulované soustavy ovládané pákovým ovladačem Joystick. Hodnoty parametrů modelů člověka jsou nalezeny iterační metodou Nelder-Mead. V případě, že je regulovanou soustavou triviální přenosová funkce s přenosem 1, daří se nalézt vhodné parametry pro všechny tři typy modelů lidského operátora. Tato regulovaná soustava nemá integrační člen, proto je vhodnější modely operátora změnit přidáním integrátoru. Nejlépe aproximoval chování skutečného člověka model pilot C.

Pokud regulujeme soustavu typu automobil s pohonem zadní nápravy, musíme si uvědomit, že soustava obsahuje dva integrátory. Ty činí soustavu obtížněji řiditelnou. Lidského řidiče dokázal vhodně aproximovat pouze model pilot B. Parametry nalezeného modelu odpovídají předpokládanému rozsahu parametrů. Z měření vyplývá, že každý model lidského operátora se hodí k jiné soustavě. Při řízení automobilu pouze na základě informace vzdálenosti od středu vozovky je vhodný pilot B. Tento model má v otevřené smyčce charakter rychlého derivačního členu.

## 6 ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsem rozebral problematiku stanovení modelu lidského operátora, který by mohl najít uplatnění v řídicích systémech. Vytvoření univerzálního modelu není možné, je třeba modely přizpůsobit úlohám, které mají řídit. Základními dvěma úlohami je řízení příčné a řízení podélné.

Provedl jsem rešerši, kde jsem se zajímal zejména o modely vycházející z kompenzačního způsobu řízení. Jejich dynamické vlastnosti jsem porovnal z hlediska otevřené smyčky zpětnovazebního systému. Dále jsem navrhl způsob, jakým lze změřit konkrétní hodnoty parametrů modelů lidského operátora s využitím programu MATLAB.

Tvorba náhradního modelu není snadná, protože každý člověk je individuální jedinec, jehož vlastnosti se s časem mění. Lidský operátor se s časem v řízení zdokonaluje. Navíc jeho schopnosti podléhají aktuální kondici. Lze tedy sestavit jen přibližný model, který navíc obsahuje nepřesnosti v podobě zanedbání neznámých parametrů.

Tato práce by se do budoucna dala rozšířit o větší počet regulovaných soustav i další tvary modelu lidského operátora. Dalším plánem do budoucna je zlepšit již provedená měření. Při řízení automobilu by bylo vhodné, aby se řidiči zobrazovala informace nejen o vzdálenosti od středu vozovky, ale i o směru jízdy vozidla. Vhodnou formou prezentace informací je simulátor jízdy z pohledu řidiče.

Teoretické poznatky jsem zpracoval jako příspěvek do soutěže STUDENT EEICT 2011, který byl publikován ve sborníku [27].

# Literatura

- [1] Havlíková, M. Dynamika lidského operátora v systémech MMS. Automatizace, 2008, vol. 51, no. 1, p. 17-20. ISSN: 0005-125X.
- [2] Havlíková, M. Člověk jako regulátor v systémech MMS. Automatizace, 2007, vol. 2007, no. 6, p. 388 ( p.) ISSN: 0005- 125X.
- [3] Havlíková, M. Simulační modely člověk\_ vozidlo. Automatizace, 2009, vol. 52, no. 4, p. 236-241. ISSN: 0005- 125X.
- [4] Havlíková, M. Spolehlivost člověka a riziko jeho selhání v systémech MMS. Automatizace, 2006, vol. 2006, no. 7- 8, p. 461 ( p.) ISSN: 0005- 125X.
- [5] Havlíková, M. Simulace únavy řidiče. Elektorevue - Internetový časopis (<http://www.elektorevue.cz>), 2010, vol. 2010, no. 54, p. 1-5. ISSN: 1213- 1539.
- [6] Jalovecký, R. Matematické modely člověka při simulaci řízení letu letounu. Sborník příspěvků 9. mezinárodní vědecké konference „Měření, diagnostika a spolehlivost palubních soustav letadel 2009“, 21.-22. října 2009, Brno, Česká republika. Brno, Univerzita obrany, 2009. 142 s. ISBN 978-80-7231-670-0. P. 48-53.
- [7] Jalovecký, R. Člověk v systému řízení letounu. Sborník příspěvků 8. mezinárodní vědecké konference „Měření, diagnostika a spolehlivost palubních soustav letadel 2008“, Brno, Univerzita obrany, 2008. P. 67-74.
- [8] Bayliss, M. A Simplified Vehicle and Driver Model for Vehicle Systems Development. Říjen 2008.
- [9] False start. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, last modified on 8. 12. 2010 [cit. 2010-12-11]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/False\\_start](http://en.wikipedia.org/wiki/False_start)>.
- [10] Brain computer interface. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 5. 12. 2010 [cit. 2010-12-11]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Brain%E2%80%93computer\\_interface](http://en.wikipedia.org/wiki/Brain%E2%80%93computer_interface)>.
- [11] Strayer, D. L., & Johnston, W. A. (2001). Driven to distraction: Dual task studies of simulated driving and conversing on a cellular telephone. Psychological Science , 12 (6), 462-466.
- [12] Bosch.cz [online]. 2010-03-08 [cit. 2010-12-8]. Robert Bosch GmbH - fb\_Night\_Vision. Dostupné z WWW: <[http://rb-kwin.bosch.com/cz/cs/safety\\_comfort/driving\\_comfort/driverassistancesystems/nightvision/index.html](http://rb-kwin.bosch.com/cz/cs/safety_comfort/driving_comfort/driverassistancesystems/nightvision/index.html)>.

- [13] Čermák, L. Budoucnost elektronických systémů : V2V auta s telepatí. Autodiesel, leden 2008, no. 8, s. 94 - 96.
- [14] Delorme, D.; Song, B. Human Driver Model for SmartAHS. Research Reports, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), Institute of Transportation Studies, UC, Berkeley. 04-01-2001, UCB-ITS-PRR-2001-12, Dostupný také z WWW: <[www.escholarship.org/uc/item/8qn889mt](http://www.escholarship.org/uc/item/8qn889mt)>. ISSN 1055-1425.
- [15] Ehmanns, D.; Hochstadter, A. Driver-Model of lane change maneuvers, Aachen, Dostupný také z WWW: <[www.pelops.de/pdf/ITS2000\\_3.pdf](http://www.pelops.de/pdf/ITS2000_3.pdf)>.
- [16] Příbyl, P.; Vysoký, P.; Novák, M. Analýza jízdy řidiče v tunelu a na volné komunikaci. *Tunel* [online]. 2006, roč. 15, 3, [cit. 2010-12-08]. Dostupný z WWW: <[www.ita-aites.cz/files/tunel/2006/3/tunel-0603-9.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/tunel/2006/3/tunel-0603-9.pdf)>.
- [17] Jong-Hae K.; Young-Woo K.; DON-HA Hwang. Modeling of Human Driving Behavior Based on Piecewise Linear Model. AUTOMATIKA, roč. 46, 2005, s. 29–37, ISSN 0005–1144.
- [18] Fuller, H. J. A. *The Virtual Driver : Integrating Physical and Cognitive Human Models to Simulate Driving with a Secondary In-Vehicle Task* [online]. [s.l.], 2010. 205 s. Dizertační práce. The University of Michigan. Dostupné z WWW: <[deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/75847/1/hjaf\\_1.pdf](http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/75847/1/hjaf_1.pdf)>.
- [19] Suzuki, T.; a kol. Modeling and Recognition of Human Driving Behavior based on Stochastic Switched ARX model. International Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC'05), p. 5095-5100, 12-12-2005, Seville, Spain. Dostupné z WWW: <[http://www.suzlab.nuem.nagoya-u.ac.jp/files/I-05-2%20Modeling%20and%20Recognition%20of%20Human%20Driving%20Behavior%20based%20on%20SSARX%20model\\_CDC05.pdf](http://www.suzlab.nuem.nagoya-u.ac.jp/files/I-05-2%20Modeling%20and%20Recognition%20of%20Human%20Driving%20Behavior%20based%20on%20SSARX%20model_CDC05.pdf)>.
- [20] Lee, K.; Peng, H. A Longitudinal human driving model for adaptive cruise control performance assessment, Symposium on Advanced Automotive Technologies, November 17-22, 2002, New Orleans.
- [21] Lee, K.; Peng, H. Identification and verification of a longitudinal human driving model for collision warning and avoidance systems. Vehicle Autonomous Systems, Vol. 2, Nos. 1/2, 2004 Dostupné z WWW: <[www-personal.umich.edu/~hpeng/Peng-Lee\\_IJVAS.pdf](http://www-personal.umich.edu/~hpeng/Peng-Lee_IJVAS.pdf)>
- [22] Wewerinke, P. H.; Modeling human learning involved in car driving, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2-5 Oct. 1994, San Antonio, TX . Dostupné z WWW: <<http://doc.utwente.nl/58970/>>.
- [23] MATLAB : The Language Of Technical Computing [online]. 2011 [cit. 2011-05-11]. Dostupné z WWW: <[http://www.mathworks.com/products/matlab/?s\\_cid=global\\_nav](http://www.mathworks.com/products/matlab/?s_cid=global_nav)>.

- [24] Šolc, F., Václavek, P., Vavřín, P. Řízení a regulace II. Brno: VUT, 2004. s. 1-230. ISBN: AMT07-004.
- [25] Havlát, P. Simulátor mobilních robotů v prostředí MATLAB/Simulink. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 63s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Hrabec.
- [26] Turbozone.ro [online]. 2008 [cit. 2011-05-10]. TurboZone Computers. Dostupné z WWW: <[http://www.turbozone.ro/fotografii/Gaming/Logitech\\_JS-Attack3.jpg](http://www.turbozone.ro/fotografii/Gaming/Logitech_JS-Attack3.jpg)>.
- [27] Boháč, P. Human Models in Control Systems. In STUDENT EEICT : Proceedings of the 17th conference, Volume 1. První vydání. Brno : Novpress s.r.o., 2011. s. 61-63. ISBN 978-80-214-4271-9.

# Seznam příloh

Příloha 1. CD

Příloha 2. Skript pro stanovení parametrů lidského operátora

Příloha 3. Modely pro Simulink

## Příloha 2.

### Mereni.m

```
warning off;
clc
clear all;
close all;

%% Konfigurace      0..zakazano, 1..povolenno
delka_mereni=10;
%volba vstupu
    step1_x=0;
    step2_x=0;
    sine1_x=1;
    sine2_x=1;

%% otevreni osciloskopu
load_system('mereni');
open_system('mereni/porovnnani');
%% nastaveni nahodneho zesileni a fazoveho posunu
x=rand(1);
while(x<0.6) %zesileni bude z intervalu (0.6;1)
    x=rand(1);
end;
fazovy_posun=randint(1,1,20627)
disp('volba nahodneho zesileni')
disp(x)
set_param('mereni/Gain','Gain',mat2str(x));
set_param('mereni/Sine Wave2','Phase',mat2str(fazovy_posun));

%% Volba vstupu
%povoleni step1
set_param('mereni/Gain1','Gain',mat2str(step1_x));
%povoleni step2
set_param('mereni/Gain2','Gain',mat2str(step2_x));
%povoleni Sine Wave1
set_param('mereni/Gain3','Gain',mat2str(sine1_x));
%povoleni Sine Wave2
set_param('mereni/Gain4','Gain',mat2str(sine2_x));
%nastaveni frekvence sinusovek
set_param('mereni/Sine Wave1','Frequency',mat2str(0.5));
set_param('mereni/Sine Wave2','Frequency',mat2str(2));

%% Mereni lidskeho operatora
sim('mereni',delka_mereni);
skutecna_doba_mereni=doba_mereni(end); %ulozi celkovy cas mereni
for(i=1:length(doba_mereni)-1)
    cas_diskretizace(i)=doba_mereni(i+1)-doba_mereni(i); %cas v jednotlivych
    end; %krocich
    cas_variance=var(cas_diskretizace);
    disp('Variance casu je:')
    disp(cas_variance)

%% ulozeni a uzavreni
%uisave('operator');
close_system('mereni/porovnnani');
%% Snizeni rozliseni
wait=waitbar(0,'Nacitani'); %ukazatel prubehu vypoctu
```



```

Q=operator;
delka_simulace=delka_mereni; %bez snizeni rozliseni
%% nastaveni parametru signalu v modelu
load_system('model_systemu');
set_param('model_systemu/Gain','Gain',mat2str(x));
set_param('model_systemu/Gain1','Gain',mat2str(step1_x));
set_param('model_systemu/Gain2','Gain',mat2str(step2_x));
set_param('model_systemu/Gain3','Gain',mat2str(sine1_x));
set_param('model_systemu/Gain4','Gain',mat2str(sine2_x));
set_param('model_systemu/Sine Wave1','Frequency',mat2str(0.5));
set_param('model_systemu/Sine Wave2','Frequency',mat2str(2));
set_param('model_systemu/Sine Wave2','Phase',mat2str(fazovy_posun));
set_param('model_systemu','Stop time',mat2str(delka_simulace));
%% fminsearch modelu pilot A
waitbar(10/100,wait,'pilot A');
start=[1 1 1 1]; %počáteční odhad
[vysledek]=fminsearch(@kriterium_pilotA,start,optimset('Display','notify','Max
    FunEvals',1000,'MaxIter',100,'TolFun',1e-2,'TolX',1e-2),Q);
%% graf nalezene funkce
sim('model_systemu',delka_simulace);
pilotA=vystup;
%% ulozeni vysledku
load('data_mereni');
vysledek_K(end+1)=vysledek(1)*skutecna_doba_mereni/delka_mereni;
vysledek_T1(end+1)=vysledek(2)*skutecna_doba_mereni/delka_mereni;
vysledek_T3(end+1)=vysledek(3)*skutecna_doba_mereni/delka_mereni;
vysledek_T2(end+1)=vysledek(4)*skutecna_doba_mereni/delka_mereni;
vysledek_Td(end+1)=vysledek(5)*skutecna_doba_mereni/delka_mereni;
save('data_mereni','vysledek_K','vysledek_T1','vysledek_T3','vysledek_T2','vys
    ledek_Td');
%% pilot B
waitbar(40/100,wait,'pilot B');
start=[1 1 1 1]; %počáteční odhad
[vysledek]=fminsearch(@kriterium_pilotB,start,optimset('Display','notify','Max
    FunEvals',1000,'MaxIter',100,'TolFun',1e-2,'TolX',1e-2),Q);
%graf
sim('model_systemu',delka_simulace);
pilotB=vystup;
%ulozeni
load('data_mereni');
vysledek_K(end+1)=vysledek(1)*skutecna_doba_mereni/delka_mereni;
vysledek_T1(end+1)=0;
vysledek_T3(end+1)=vysledek(2)*skutecna_doba_mereni/delka_mereni;
vysledek_T2(end+1)=vysledek(3)*skutecna_doba_mereni/delka_mereni;
vysledek_Td(end+1)=vysledek(4)*skutecna_doba_mereni/delka_mereni;
save('data_mereni','vysledek_K','vysledek_T1','vysledek_T3','vysledek_T2','vys
    ledek_Td');
%% pilot C
waitbar(70/100,wait,'pilot C');
start=[1 1 1]; %počáteční odhad
[vysledek]=fminsearch(@kriterium_pilotC,start,optimset('Display','notify','Max
    FunEvals',1000,'MaxIter',100,'TolFun',1e-2,'TolX',1e-2),Q);
%graf
sim('model_systemu',delka_simulace);
pilotC=vystup;
%ulozeni
load('data_mereni');

```

```

vysledek_K(end+1)=vysledek(1)*skutecna_doba_mereni/delka_mereni;
vysledek_T1(end+1)=0;
vysledek_T3(end+1)=0;
vysledek_T2(end+1)=vysledek(2)*skutecna_doba_mereni/delka_mereni;
vysledek_Td(end+1)=vysledek(3)*skutecna_doba_mereni/delka_mereni;
save('data_mereni','vysledek_K','vysledek_T1','vysledek_T3','vysledek_T2','vysledek_Td');
%% prezentace vysledku
waitbar(100/100,wait,'kresleni grafu');
figure(1)
hold on
plot(doba_mereni,pilotA,'blue')
plot(doba_mereni,pilotB,'magenta')
plot(doba_mereni,pilotC,'red')
plot(doba_mereni,Q,'green')
plot(doba_mereni,puvodni_signal,'black');
legend('pilotA','pilotB','pilotC','lidsky operator','puvodni signal')
xlabel('čas[s]')
ylabel('vzdálenost y od středu vozovky')
close(wait);
param_pilotA=[vysledek_K(end-2),vysledek_T1(end-2),vysledek_T2(end-2),vysledek_T3(end-2),vysledek_Td(end-2)];
param_pilotB=[vysledek_K(end-1),vysledek_T1(end-1),vysledek_T2(end-1),vysledek_T3(end-1),vysledek_Td(end-1)];
param_pilotC=[vysledek_K(end),vysledek_T1(end),vysledek_T2(end),vysledek_T3(end),vysledek_Td(end)];

```

## kriterium\_pilotA.m

```

function krit=kriterium(param,vystup_pozadovany)
load_system('model_systemu');
K=param(1);
den_model1=[param(2) 1];
num_model2=[param(3) 1];
den_model2=[param(4) 1];
Td=abs(param(5));
if
((param(1)<0.1)|(param(2)<0.1)|(param(3)<0.1)|(param(4)<0.1)|(param(5)<0.1)|(param(1)>100)|(param(2)>10)|(param(3)>10)|(param(4)>10)|(param(5)>10))
    krit=1000000; %%parametry nesmi byt zaporne
else
    %změna parametrů
    set_param('model_systemu/K','Gain',mat2str(K));
    set_param('model_systemu/Model1','Denominator',mat2str(den_model1));
    set_param('model_systemu/Model2','Numerator',mat2str(num_model2));
    set_param('model_systemu/Model2','Denominator',mat2str(den_model2));
    set_param('model_systemu/Td','Delay',mat2str(Td));
    sim('model_systemu');
    krit=(vystup-vystup_pozadovany)'*(vystup-vystup_pozadovany);
end;
end

```

## kriterium\_pilotB.m

```
function krit=kriterium(param,vystup_pozadovany)
load_system('model_systemu');
K=param(1);
num_model2=[param(2) 1];
den_model2=[param(3) 1];
Td=abs(param(4));
if((param(1)<0.1)|(param(2)<0.1)|(param(3)<0.1)|(param(4)<0.1)|(param(1)>100)|
    (param(2)>10)|(param(3)>10)|(param(4)>10))
    krit=1000000; %%parametry nesmi byt zaporne
else
    %změna parametrů
    set_param('model_systemu/K','Gain',mat2str(K));
    set_param('model_systemu/Model1','Denominator',mat2str(1));
    set_param('model_systemu/Model2','Numerator',mat2str(num_model2));
    set_param('model_systemu/Model2','Denominator',mat2str(den_model2));
    set_param('model_systemu/Td','Delay',mat2str(Td));

    sim('model_systemu');
    krit=(vystup-vystup_pozadovany)'*(vystup-vystup_pozadovany);
end;
end
```

## kriterium\_pilotC.m

```
function krit=kriterium(param,vystup_pozadovany)
load_system('model_systemu');
K=param(1);
den_model2=[param(2) 1];
Td=abs(param(3));
if((param(1)<0.1)|(param(2)<0.1)|(param(3)<0.1)|(param(1)>100)|(param(2)>10)|
    (param(3)>10))
    krit=1000000; %%parametry nesmi byt zaporne
else
    %změna parametrů
    set_param('model_systemu/K','Gain',mat2str(K));
    set_param('model_systemu/Model1','Denominator',mat2str(1));
    set_param('model_systemu/Model2','Numerator',mat2str(1));
    set_param('model_systemu/Model2','Denominator',mat2str(den_model2));
    set_param('model_systemu/Td','Delay',mat2str(Td));

    sim('model_systemu');
    krit=(vystup-vystup_pozadovany)'*(vystup-vystup_pozadovany);
end;
end
```

## Příloha 3.

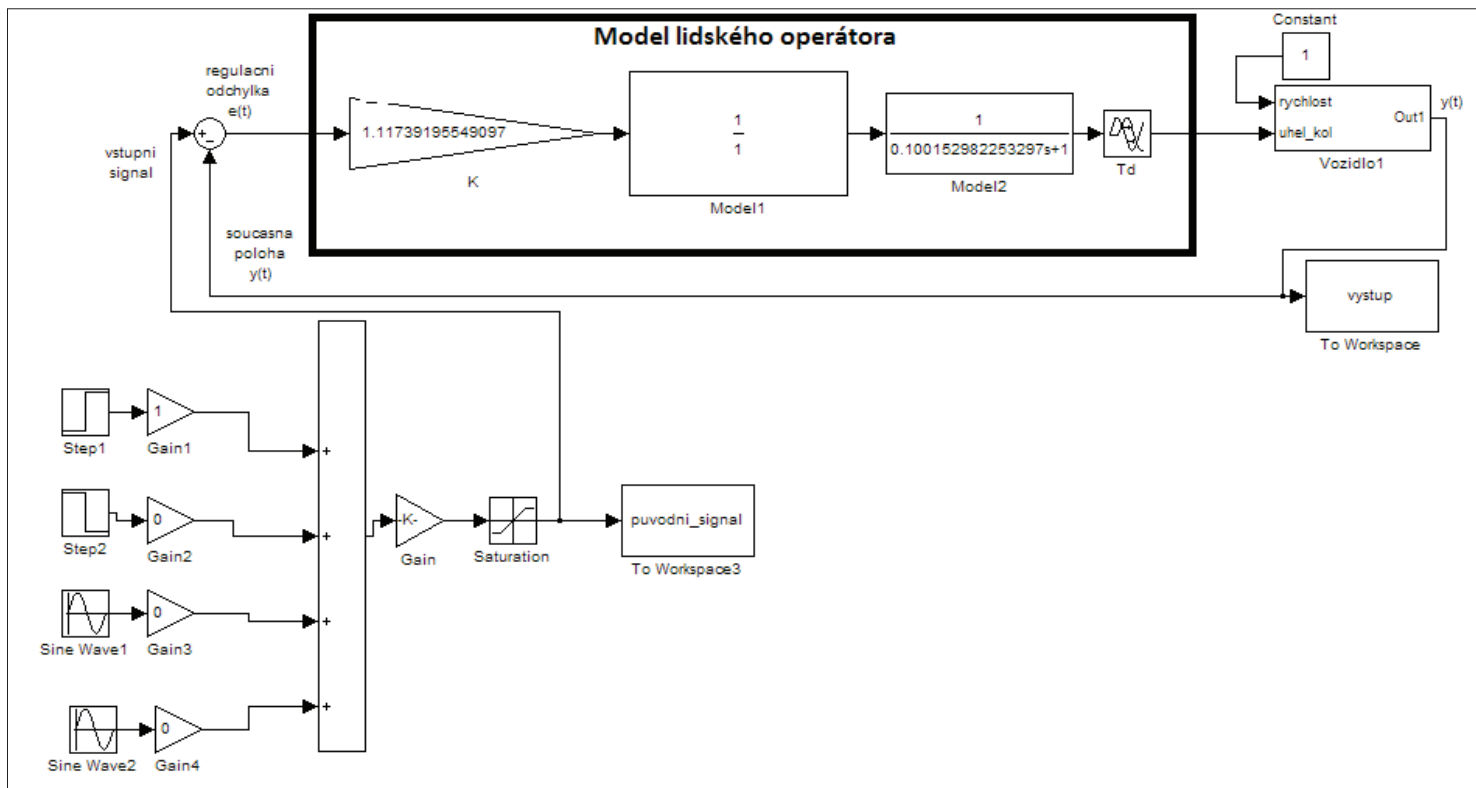


Schéma náhrady za lidského operátora - model\_mereni.mdl

### Embedded MATLAB Function1

```
function y = fcn(u)
if(u==0)
    tic
end;
pause(0.01)
u=toc;
y = u;
```

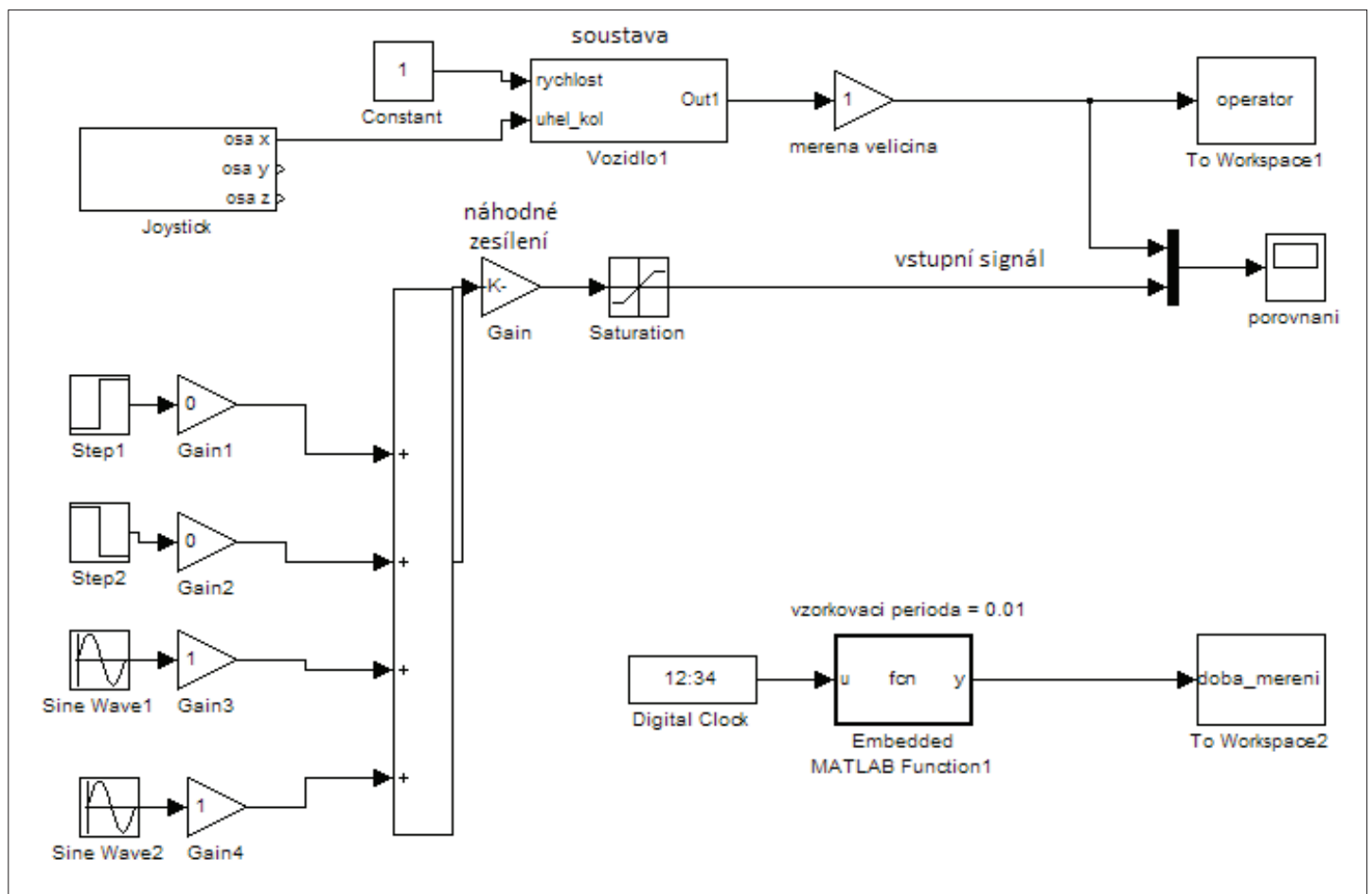
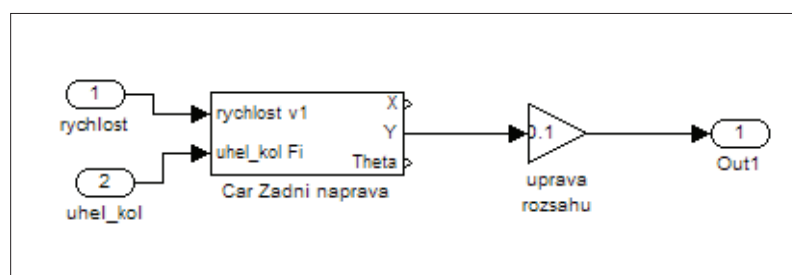
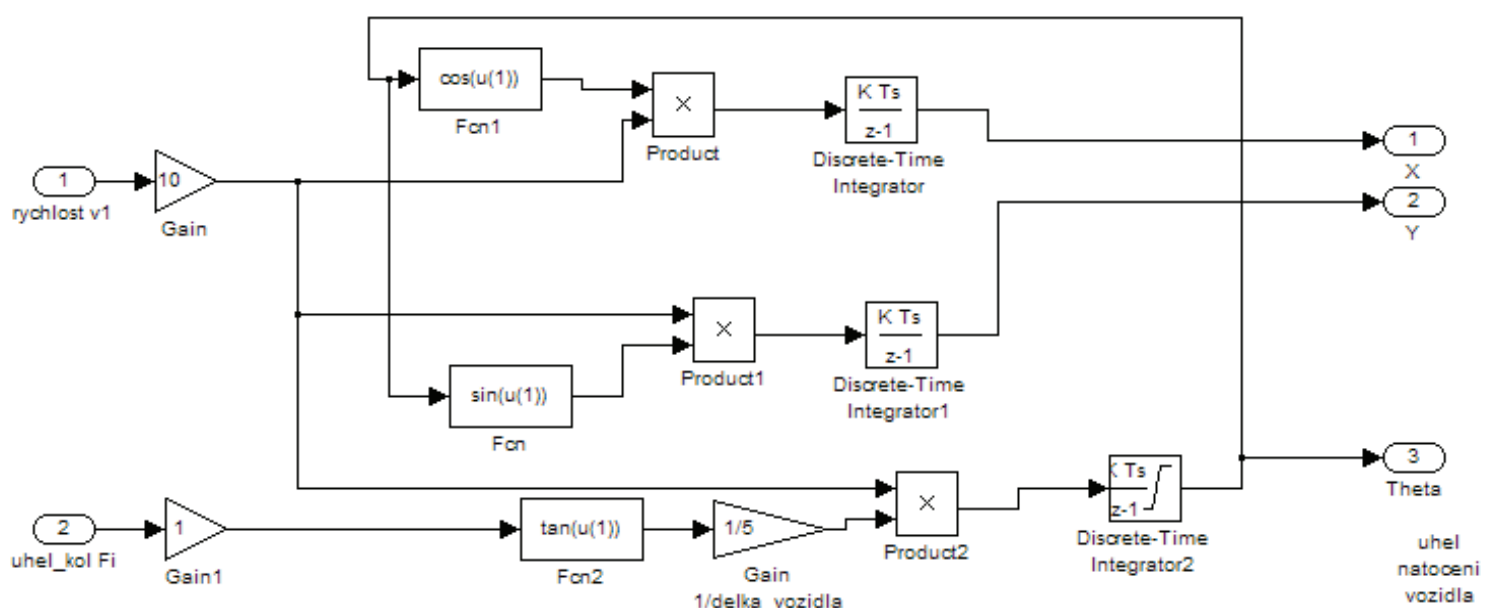


Schéma měření lidského operátora - mereni.mdl



### Vozidlo1



## Car Zadni naprava